

Andreas Walkling

**Schwellenuntersuchung zur physiologischen
Blendung für ortsfeste Straßenbeleuchtung –
Weiterentwicklung der *TI*-Formel für nasse und
trockene Straßen**

Schriften der Ilmenauer Lichttechnik

Herausgegeben von

Prof. Dr. Christoph Schierz,

Fachgebiet Lichttechnik

an der Technischen Universität Ilmenau.

Band 20

Diese Reihe setzt ab dem Band 20 die „*Publikationsreihe
des Fachgebietes Lichttechnik in Ilmenau*“ fort.

Schwellenuntersuchung zur physiologischen Blendung für ortsfeste Straßenbeleuchtung

Weiterentwicklung der *TI*-Formel für nasse
und trockene Straßen

Andreas Walkling



Universitätsverlag Ilmenau
2017

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung:	22. Dezember 2015
1. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz (Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Stephan Völker (Technische Universität Berlin)
3. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh (Technische Universität Darmstadt)
Tag der Verteidigung:	23. September 2016

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

ISSN 2513-1656

ISBN 978-3-86360-161-4 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-201600083

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau.

Mein besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil. Ch. Schierz für seine Betreuung und kritische Durchsicht der Arbeit. Des Weiteren möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. S. Völker und Prof. Dr.-Ing. habil. T. Khanh für die Übernahme der Korreferate bedanken.

Ebenso geht mein besonderer Dank an Dipl.-Ing. A. Ueberschaer (Versuchsaufbau und Auswertung), Dr. rer. nat. habil. W. Neundorf (*TI*-Modellierung) und Hon.-Prof. Dipl.-Ing. A. Stockmar (*TI*-Berechnung).

Für Anregungen und kritische Hinweise danke ich den Mitarbeitern und Studenten des Fachgebietes Lichttechnik. Stellvertretend für alle möchte ich hier Dr.-Ing. St. Wolf und Dipl.-Ing. R. Nolte dankend erwähnen.

Meinen Eltern, meinem Bruder und Freunden danke ich für die Unterstützung und ihr Verständnis.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beinhaltet eine grundlegende Schwellenuntersuchung zur physiologischen Blendung für ortsfeste Straßenbeleuchtung und leistet einen Beitrag zur Verbesserung der Sichtbarkeit im nächtlichen Straßenverkehr. Die damit verbundene Förderung der Verkehrssicherheit kann die nächtlichen Verkehrsunfälle reduzieren helfen.

Aus der Literaturrecherche ist ersichtlich, dass die Nichtberücksichtigung einer zugleich wahrgenommenen Kontrastminderung durch einen Schleier infolge Blendung (auch physikalischer Effekt des Blendungsschleiers genannt) in der Straßenbeleuchtungsnorm eine erhebliche Lücke darstellt. Bisher geht man bei der TI -Formel von einer Schwellenwerterhöhung ohne diesen Effekt aus, die daher die tatsächlichen Wahrnehmungsbedingungen weniger exakt widerspiegelt und bei der Blendungsbewertung zu Fehltritten führt.

Es wurde eine Versuchsanordnung entwickelt, die es ermöglichte, den Einfluss dieser Kontrastminderung bei der Schwellenmessung zu untersuchen. Als Einflussgrößen wurden das Adaptations- bzw. Blendungsniveau, die Darbietungsdauer und -art verwendet.

Es wird erstmals nachgewiesen, dass der Ur-Versuch von Narisada aus dem Jahre 1977 zur Schwellenmessung mit äquivalentem Blendungsschleier replizierbar und verlässlich ist. Sein gefundenes experimentelles Ergebnis kann daher bestätigt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Blendungsfall die Komponente der Kontrastminderung die Leuchtdichteunterschiedsschwelle stärker beeinflusst als die Komponente der gleichzeitig auftretenden Netzhautaufhellung. Eine Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle mit Blendungsschleier wird von der Darbietungsart ebenso nachgewiesen. Ein Vergleich mit Schwellenwerten von Blackwell/Adrian ergibt keine Übereinstimmung aufgrund der dort fehlenden physikalischen Wirkung des Blendungsschleiers.

Aus dem umfassenden Schwellenmodell nach Narisada und den eigenen Messdaten lassen sich erstmals neuartige, erweiterte TI -Formeln für foveales und peripheres Sehen ableiten. Damit ist es möglich, die Blendung korrekter quantitativ zu er-

fassen, weil einerseits die Kontrastminderung infolge Blendungsschleier einbezogen wird und weil andererseits die neuen Blendungsformeln von der Hintergrundleuchtdichte eines Hindernisses im Bewertungsfeld abhängen, wodurch die insbesondere auf nasser Straße vorhandene inhomogene Leuchtdichteverteilung genauer einberechnet wird.

Abstract

This work includes basic research focusing on the disability glare caused by stationary road lighting on wet and dry roads, and contributes to the improvement of visibility during night-time driving. Such promotion affiliated with road safety can help to reduce the amount of traffic incidences that occur at night.

The literature review shows a considerable gap regarding the failure to take into account perceived luminance contrast reduction from veiling, caused by disability glare (also known as the physical effect of the veiling or masking effect), in road lighting standards. Until now, the *TI*-Formula of a threshold value increase has been assumed without this effect. Therefore, the true viewing conditions are not accurately reflected and can lead to misjudgments in glare evaluation.

An experimental apparatus making it possible to investigate the influence of perceived contrast reduction from veiling on threshold measurements was developed. Adaptation level, observation time and performance type (i. e. foveal or peripheral vision) were used as influencing variables.

It was first proven that Narisada's original study for threshold measurement with veiling from 1977 is replicable and reliable. From there, his experimental results can be confirmed.

The results show that, in the case of glare, the components of the reduced contrast of the luminance difference threshold have a stronger influence than the components on the simultaneously occurring retinal illumination. Dependency of the difference threshold with the veiling is also proven from the performance type. Due to the lack of physical effects of the veiling luminance, there is no match when comparing the threshold values from Blackwell/Adrian to the underlying threshold measurement.

From Narisada's threshold model and one's own measuring data, further *TI*-Formulae can be derived in terms of foveal and peripheral vision. Thus, it is possible to detect the correct glare more quantitatively since the physical effect of veiling luminance is taken into account. The newly developed glare formula is also dependent on the background luminance of an obstacle in the assessment field, in

which the existing inhomogeneous luminance distribution, especially on wet roads, is more accurately taken into account.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Zur Problematik der Blendungsbewertung.....	13
1.2	Aufgabenstellung	15
2	Grundlagen	17
2.1	Leuchtdichteunterschied und Kontrast.....	17
2.2	Leuchtdichteunterschiedsschwelle ohne Blendung	19
2.3	Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit Blendung	21
3	Erkenntnisstand der Schwellenuntersuchungen	29
3.1	Leuchtdichteunterschiedsschwelle ohne Blendungsschleier	29
3.2	Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit Blendungsschleier	36
3.3	Einfluss der Darbietungsart.....	41
3.4	Zusammenfassung und Hypothesen	45
4	Methodik	47
4.1	Versuchsmethode	47
4.2	Versuchsaufbau	48
4.2.1	Versuchsapparatur	48
4.2.2	Versuchssteuerung.....	51
4.2.3	Versuchsbedingungen	54
4.3	Versuchsdurchführung.....	56
4.3.1	Testserien	57
4.3.2	Ablauf der Untersuchung	59
4.3.3	Versuchsreihen.....	61
4.4	Versuchspersonen	62
4.5	Fehlerdiskussion und statistische Auswertung	63
4.5.1	Apparaturfehler	63
4.5.2	Streuung der Versuchspersonen	68
4.5.3	Feldgrößenfehler	70
4.5.4	Adaptationsfehler.....	70
4.5.5	Statistische Auswertung	73
5	Ergebnisse und Diskussion	77
5.1	Versuchsreihe I: Narisada-Replikation.....	77
5.2	Versuchsreihe II: Foveale Antwort.....	79

5.3	Versuchsreihe III: Extrafoveale Antwort	82
5.4	Zusammenfassung	85
6	Überarbeitung der TI-Blendungsformel	87
6.1	Vorbemerkungen	87
6.2	Modellierung nach Eichhoff (ohne Kontrastminderung)	88
6.3	Eigene Modellierung (mit Kontrastminderung)	91
6.3.1	Foveale Näherungsgleichung	96
6.3.2	Extrafoveale Näherungsgleichung	98
6.3.3	Zusammenfassung	99
6.4	Berechnungsergebnisse und Diskussion	101
6.5	Zusammenfassung	106
7	Fazit und Ausblick	107
8	Anhang	111
8.1	Versuchsfelder in der Praxis	111
8.2	Zeitliche Stabilität der Projektoren	112
8.3	Zeitlicher Ablauf der Testserien A und B	113
8.4	Zur Überprüfung der Normalverteilung	114
8.5	Schwellenwerte der Versuchsreihe I	115
8.6	Schwellenwerte der Versuchsreihe II	116
8.7	Schwellenwerte der Versuchsreihe III	117
8.8	Zur linearen Interpolation der Schwellenwertkurven	118
8.9	Näherungsgleichungen mit Minimierung der Varianz von ΔL_{\min}	119
9	Literaturverzeichnis	121
Abbildungsverzeichnis		127
Tabellenverzeichnis		135
Abkürzungen und Symbole		137

1 Einleitung

1.1 Zur Problematik der Blendungsbewertung

Im nächtlichen Straßenverkehr wird die Sicherheit beim Steuern eines Fahrzeuges nahezu ausschließlich von der Sehsicherheit bestimmt. Diese hängt wiederum von den Sichtbedingungen und der Größe der optischen Information ab, die nachts durch das eingeschränkte periphere Sehen jedoch erheblich vermindert ist. Daraus ergibt sich ein erhöhtes Unfallrisiko gegenüber dem Tag.

Bei Nachtfahrten unter ungünstigen Witterungsbedingungen treten noch weit größere Wahrnehmungsprobleme auf. Auf regennasser Straße verändert sich die inhomogene Leuchtdichteverteilung deutlich [Van 76] [CIE 10]. „Nass ist eine Straße nicht nur während des Regensfalls, sondern noch während der anschließenden Trocknungszeit, die bei völlig durchnässter Deckschicht... in der kühlen und feuchten Jahreszeit, wenn der Anteil der Dunkelstunden besonders hoch ist, Tage währen kann. In diesen Fällen verliert also das Reflexionsverhalten des trockenen Belags seine Bedeutung für die Praxis“, schreibt Kebschull [Keb 66] [Wal 14b]. Der aufgrund vermehrter Blendung und gesteigerter Blendempfindlichkeit einhergehende Sichtbarkeitsverlust erhöht das Unfallrisiko weiter. Eine Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) über den Einfluss der Witterung auf das Unfallgeschehen zeigte, dass bei nasser Straße die Unfallzahlen ca. 19 % höher sind als bei trockener [Arm 96]. Die von Kebschull postulierte Forderung nach gleichbleibenden Sehverhältnissen bei nasser und trockener Straße lässt sich somit als Leitbild für die vorliegende Arbeit ableiten [Keb 66].

Es ist bekannt, dass die Leuchtdichteverteilung im Wesentlichen die Güte einer ortsfesten Straßenbeleuchtungsanlage bestimmt. Deshalb spielen für die normative Bewertung der Güte das Beleuchtungsniveau, die Beleuchtungsverteilung und die Blendung eine herausragende Rolle. Bemerkenswert ist, dass ohne Begrenzung der Blendung jegliches Bestreben nach Sehsicherheit (und Sehkomfort) untergraben werden kann [Lin 76].

Bei der Blendung durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung unterscheidet man zwischen der physiologischen Blendwirkung und der psychologischen Blendempfindung. Die physiologische Blendung bewirkt eine Minderung der Sehfunktionen bzw. Sehleistung. Die psychologische Blendung führt bei längerer Einwirkung zu

Unbehagen und zu vorzeitiger Ermüdung [Lit 81]. Beide Blendungsarten sind voneinander unabhängig und führen zu verschiedenen Ergebnissen.

Frühere Untersuchungen zur psychologischen Blendung und ihren Grenzwerten für die äquivalenten Schleierleuchtdichte für das BCD-Kriterium deuten an, dass die physiologische schwächer als die psychologische Blendung die Güte einer Beleuchtungsanlage beeinflusst [Adr 65], insbesondere bei höherer Straßenleuchtdichte und kleinerer Lichtaustrittsfläche der Leuchte. Dennoch hat sich in der heutigen Beleuchtungspraxis zunehmend die Begrenzung der physiologischen Blendung durchgesetzt [CIE 10].

Grundlegende Arbeiten über die physiologische Blendung sind bereits Anfang des 20. Jahrhunderts von Holladay zur Bestimmung der äquivalenten Schleierleuchtdichte durchgeführt worden [Hol 26]. Weiterführende Experimente dazu, speziell zu Fragen der Exponenten des Blendwinkels, der Sehwinkelgröße des Sehobjektes und des Blendwinkelbereiches zwischen der Richtung zur Blendlichtquelle und der Blickrichtung sowie der Addierbarkeit der Schleierleuchtdichte bei mehreren Blendquellen, unternahmen Fry [Fry 55], Adrian [Adr 61a] [Adr 61b] [Adr 64], Vos/Bouman [Vos 60], Crawford [Cra 36] und Hartmann [Har 63] [Har 74]. Zahlreiche Untersuchungen von Vos/Van den Berg führten 1999 zu einer modifizierten Gleichung für die äquivalente Schleierleuchtdichte, die den Einfluss des Alters, der okularen Pigmentierung und eine Erweiterung des Blendwinkelbereiches beinhaltet [Vos 99] [Wal 12] [Wal 14a].

Basierend auf Veröffentlichungen zur Messung und Berechnung der Unterschiedsschwelle von Blackwell und Adrian [Bla 59] [Adr 69a] gab Eichhoff 1970 erstmals eine Näherungsgleichung für ein Maß zur Kennzeichnung der Blendwirkung an: die prozentuale Schwellenwerterhöhung TI („threshold increment“) [Eic 70]. Die TI -Formel wird bis heute als die Gütekennziffer zur Bewertung der physiologischen Blendung in nationalen und internationalen Normen weltweit zur Anwendung empfohlen [DIN 04] [CIE 10].

Diese Formel erweist sich jedoch als weniger geeignet zur Beschreibung der Blendwirkung, weil es die Komponente der Netzhautaufhellung einberechnet und nicht die ebenso auftretende Komponente der wahrgenommenen Kontrastminde-

rung, die viel stärker als jene die Schwellenwerterhöhung im Blendungsfall beeinflusst [Nar 95].

Auch ist diese Formel auf Fahrbahnen ungeeignet, die deutlich inhomogene Leuchtdichteverteilungen zeigen, wie der kritische Fall der nassen Fahrbahn [Nar 95]. Deshalb wird sie in den Normen zur Anwendung auf nasser Straße nicht empfohlen [DIN 04] [CIE 10]. Das bedeutet, dass es seitens der Leuchtenindustrie keine Lichtstärkeverteilungen für Straßenleuchten gibt, die blendungstechnisch für die nasse Straße optimiert sind. Zudem ist es nach dem normativen TI -Berechnungsverfahren nicht möglich, den im Bewertungsfeld real stattfindenden Blickrichtungswechsel des Fahrzeugführers einzubeziehen. Beide Nachteile verursachen eine erhebliche Sicherheitslücke bei der heutigen Blendungsbewertung für die ortsfeste Straßenbeleuchtung vornehmlich für nasse Straßen.

Weiterführende, richtungsweisende Untersuchungen zur Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit Blendungsschleier und zur Schleierleuchtdichte bei inhomogener Leuchtdichterverteilung erfolgten unter anderem von Narisada und Moon/Spencer [Nar 77] [Moo 45]. Insbesondere die Arbeit von Narisada benutzte eine erweiterte Schwellenmessmethode, deren Ergebnisse zur Quantifizierung der Bewertung der physiologischen Blendung mit inhärenter Kontrastminderung und daher zur Weiterentwicklung der TI -Formel herangezogen werden können. Es fehlt jedoch bisher eine umfassende Untersuchung, die seine Messmethode bestätigt und gegebenenfalls erweitert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll diese umfassend bestätigt und praxisbezogen erweitert werden. Es soll zudem gezeigt werden, ob und wie aus den Messergebnissen die heutige Bewertung der physiologischen Blendung nach TI weiterentwickelt und eine präzisere Gleichung mathematisch gewonnen werden kann [Sch 14].

1.2 Aufgabenstellung

Ausgehend von Untersuchungen von Narisada verfolgt die vorliegende Arbeit zwei Ziele: Erstens soll die Leuchtdichteunterschiedsschwelle in Abhängigkeit der Parameter Leuchtdichte, Darbietungsdauer und Darbietungsart untersucht werden.

Zweitens soll anhand der Untersuchungsergebnisse die TI -Formel sowie das TI -Berechnungsverfahren modifiziert werden, um den Wert für TI korrekter zu erfassen.

Um eine möglichst breite Basis der Überarbeitung der TI -Blendungsformel zu erreichen, wurden drei unabhängige Versuchsreihen entworfen:

1. Ermittlung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle unter den Versuchsbedingungen nach Narisada, um eine Reproduzierbarkeit seines Ur-Versuchs erstmals nachzuweisen (Narisada-Replikation, foveale Antwort).
2. Ermittlung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle unter veränderten Versuchsbedingungen nach Narisada hinsichtlich der Darbietungsdauer (foveale Antwort).
3. Ermittlung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle unter veränderten Versuchsbedingungen nach Narisada hinsichtlich der Darbietungsart (extrafoveale Antwort).

2 Grundlagen

2.1 Leuchtdichteunterschied und Kontrast

Die Detektion von Objekten bzw. Hindernissen vom Fahrzeugführer bei Dunkelheit im Straßenverkehr wird entscheidend durch die Wahrnehmung von Leuchtdichteunterschieden (als die elementarste Sehfunktion) beeinflusst [Eck 93]. Das Farbensehen spielt dabei eine untergeordnete Rolle, weil der Leuchtdichtebereich der ortsfesten Straßenbeleuchtung in der Regel im mesopischen Bereich liegt [Eck 93]. Es soll daher in der vorliegenden Arbeit der Helligkeitsunterschied (Leuchtdichteunterschied) und kein Farbkontrast betrachtet werden.

Der Leuchtdichteunterschied (ΔL) wird durch die einfache Beziehung $L_o - L_u$ definiert. Darin ist L_o die Leuchtdichte des Objektes, und L_u ist die Leuchtdichte der Umgebung vom Objekt. Der daraus resultierende relative Leuchtdichteunterschied wird als Kontrast (K) bezeichnet:

$$K = \frac{L_o - L_u}{L_u}. \quad (1)$$

Je nachdem, ob das Objekt heller oder dunkler als sein Hintergrund ist, spricht man von Positiv- oder Negativkontrast. Im Gegensatz zur Kfz-Scheinwerferbeleuchtung und der ortsfesten Straßenbeleuchtung von nassen Straßen tritt bei trockenen Straßen überwiegend der Negativkontrast im Bewertungsfeld auf. Ziel ist es, die Objekte als Silhouette gegen die aufgehellte Fahrbahn sichtbar zu machen. Um eine maximale Aufhellung zu erreichen, werden Anordnung und Lichtstärkeverteilung der Leuchten optimiert. Eine Grenze dieses Beleuchtungsprinzips ist, dass Objekte am Fahrbahnrand mit anderen Hintergründen als der Fahrbahn kontrastieren, wodurch eine rechnerische Erfassung der Kontrastbedingungen dort schwierig ist. Daher soll bei der vorliegenden Arbeit der zu untersuchende maximale Sehfeldbereich auf eine typische Fahrbahnbreite einer Hauptverkehrsstraße von 7 m beschränkt werden.

Abbildung 1 zeigt typische Kontrastverläufe zwischen zwei Straßenleuchten für verschiedene Reflexionsgrade eines Objektes längs einer trockenen Straße. Das Objekt ist eine senkrecht stehende Hindernistafel mit einer Kantenlänge von 20 cm x 20 cm, welche für derartige Untersuchungen typischerweise verwendet wird [Hen 69] [Nar 95]. Der ungleichmäßige Verlauf der Leuchtdichteunterschiede

längs zur Fahrbahn zeigt, dass insbesondere helle Objekte sowohl im Positiv- als auch Negativkontrast erscheinen. Hingegen treten dunkle Objekte größtenteils im Negativkontrast auf. Im Übergangsbereich zwischen beiden Kontrastarten besteht Tarnung für das Hindernis. Es wird dann unsichtbar, weil sein tatsächlicher Leuchtdichteunterschied kleiner als die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (ΔL_{\min}) ist [Eck 93].

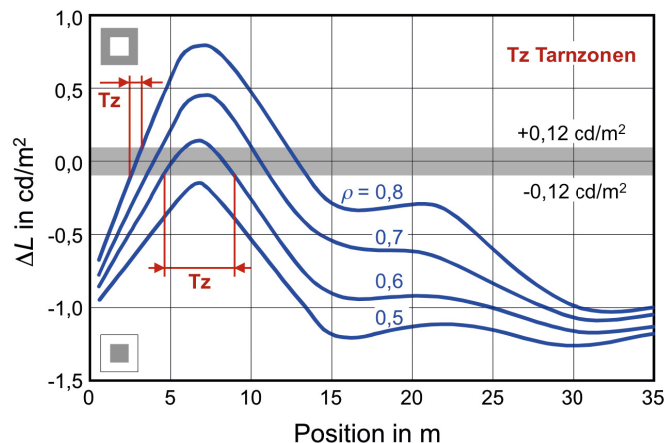


Abbildung 1: Leuchtdichteunterschiede ΔL und Tarnzonen T_z für verschiedene Reflexionsgrade (ρ) einer Hindernistafel als Funktion einer straßenachsenparallelen Position zwischen zwei Straßenleuchten (nach Hentschel [Hen 87]). Der Wert für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} beträgt hier $0,12 \text{ cd/m}^2$ (Bild: Ch. Schierz)

Auch quer zur Fahrbahn ist die Ausbildung von Tarnzonen unterschiedlich verteilt. Kritische Situationen mit großer Tarnwahrscheinlichkeit entstehen bei einer in Europa häufig anzutreffenden einseitigen Anordnung der Leuchten auf der gegenüberliegenden Fahrbahnhalfte, wo die Fahrbahnleuchtdichte deutlich abnimmt und gleichzeitig der Leuchtdichteverlauf von Fahrbahn und Hindernissen relativ gleichmäßig ist. Bei einer zweiseitigen Leuchtenanordnung (wie in Großbritannien beispielsweise verwendet) fällt durch eine relativ größere Fahrbahnleuchtdichte und eine größere Objektleuchtdichteungleichmäßigkeit der Tarnbereich hingegen kleiner aus [Hen 67].

Aufgrund der deutlich inhomogenen Leuchtdichteverhältnisse auf nasser Straße, die sich in hellen, eng begrenzten Reflexstreifen und sehr dunklen, großflächigen Tarnstreifen äußert (Kapitel 1.1), sind die Tarnzonen im Allgemeinen stärker für dunkle Objekte auf nasser Straße ausgebildet als auf trockener [Keb 66] [Lec 94] [CIE 10].

2.2 Leuchtdichteunterschiedsschwelle ohne Blendung

Um ein Objekt bzw. Hindernis sehen zu können, muss der tatsächliche Kontrast K größer sein als die Kontrastschwelle (K_{\min}). Sonst tritt Tarnung auf. Die Kontrastschwelle ist ein Mindestkontrast, der gerade noch wahrnehmbar ist. Das Gleiche gilt auch für den tatsächlichen Leuchtdichteunterschied und die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle). Je nach Adaptationsleuchtdichte (L_a) muss ein Mindestleuchtdichteunterschied zwischen Objekt und Hintergrund überschritten werden, um das Objekt sichtbar zu machen [Eck 93].

In der Literatur liegt zur Beschreibung der L_a ohne Blendung keine Einheitlichkeit vor. Meistens wird ihr die Leuchtdichte der Umgebung vom Objekt gleichgesetzt, welche zudem keine einheitliche Bezeichnungsweise hat. Diese wird beispielsweise als Umgebungsleuchtdichte, Umfeldleuchtdichte, Hintergrundleuchtdichte oder vereinfachend sogar als mittlere Fahrbahnleuchtdichte (L_m) bezeichnet.

Der Wert für die Unterschiedsschwelle hängt im Allgemeinen von den Versuchs- bzw. Sehbedingungen ab. Im Wesentlichen wird er von den folgenden Parametern beeinflusst: Adaptationsleuchtdichte, Sehwinkel des Objektes (α), Darbietungsdauer (t), Kontrastart des Objektes, Alter des Beobachters und schließlich von der Art der Darbietung (ob das Sehobjekt foveal oder extrafoveal auftaucht).

Eine allgemeine Beziehung zwischen der Unterschiedsschwelle und Adaptationsleuchtdichte sowie Objektgröße wird in Abbildung 2 gezeigt. Die Werte für die Unterschiedsschwelle sind für die scheinbaren Sehwinkelgrößen 5' (Bogenminuten), 10' und 20' dargestellt. Wie erwartet, steigt die Unterschiedsschwelle mit zunehmender Adaptationsleuchtdichte und mit abnehmender Objektgröße. Die Sehwinkelgröße von 10' steht für ein Objekt, das typischerweise als kritische Größe zur Kennzeichnung der Sehaufgabe im Straßenverkehr in der Literatur benutzt wird [Hen 69] [Nar 77]. Das ist ein Grund, warum bei der vorliegenden Arbeit diese favorisiert wird. Die Beobachtung des Standard-Objektes (d. h. quadratische Fläche von der Größe 20 cm x 20 cm) findet daher aus einer Entfernung von etwa 70 m und unter einem Beobachtungswinkel von etwa 1,2° (gegen die Horizontale nach unten geneigt) statt. Diese Geometrie der Beobachtung ist mit dem Beobachterstandort aus DIN EN 13201-3 vergleichbar [DIN 04], wo der Beobachter unter einem Winkel von etwa 1° auf die optische Mitte des Bewertungsfeldes blickt. Des

Weiteren erfassen die Sehwinkelgröße von 10' den Worst Case, wenn man die kritischen Sehwinkel (von 12,7' und 19,1') bei Gefahrenbremsung auf trockener bzw. nasser Stadtstraße (60 km/h) bedenkt.

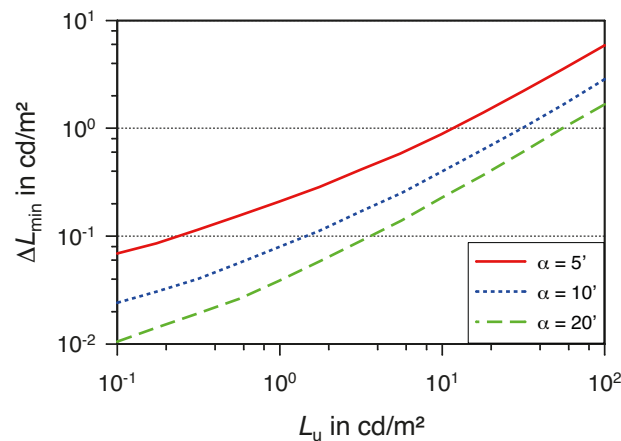


Abbildung 2: Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} für verschiedene Sehwinkel α des Objektes im Bereich der Straßenbeleuchtung als Funktion der Umgebungsleuchtdichte L_u (nach Adrian [Adr 95])

Ein Einfluss der Darbietungsdauer auf die notwendige Unterschiedsschwelle ist ebenfalls vorhanden. Je kürzer die Darbietungsdauer, umso höher die notwendige Unterschiedsschwelle. Unter praktischen Bedingungen fixiert der Fahrzeugführer Hindernisse innerhalb einer sehr kurzen Zeit, die etwa zwischen 0,1 s und 0,2 s liegen kann [Nar 74]. Eine Darbietungsdauer von 1 s oder länger ist deshalb für den in der vorliegenden Arbeit zu betrachtenden Anwendungsfall zu groß.

Zusätzlich ist ein Einfluss des Alters auf die notwendige Unterschiedsschwelle vorhanden. Im Bereich geringeren Alters (20–35 Jahre) ist der Einfluss vernachlässigbar klein. Ab einem höheren Alter (von etwa 65 Jahre) wächst die Unterschiedsschwelle erheblich an [Adr 95]. Deshalb sollte das Alter bei der Auslegung von Straßenbeleuchtungsanlagen generell berücksichtigt werden, zumal die Mobilität für Ältere immer wichtiger wird. Rund 22 % der über 75-Jährigen nutzten 2010 fast täglich das Auto, Tendenz steigend [Hol 14]. In der vorliegenden Arbeit soll der Alterseinfluss jedoch nicht untersucht werden.

Weiterhin liegt ein Einfluss der Darbietungsart auf die Unterschiedsschwelle vor. Im Straßenraum und insbesondere auf der Fahrbahn sowie am Fahrbahnrand treten Hindernisse nicht nur foveal sondern auch extrafoveal auf. Der Einfluss der Position steigt im Sehfeld mit zunehmender Exzentrizität bzgl. Blickrichtung deut-

lich an. Je größer der Winkel der peripheren Lage, umso größer ist die notwendige Erhöhung der fovealen Unterschiedsschwelle, um Hindernisse auch extrafoveal sichtbar zu machen. Bei der Auslegung von Straßenbeleuchtungsanlagen wird dieser Effekt normativ ansatzweise einbezogen, indem das sogenannte Umgebungs-Beleuchtungsstärkeverhältnis (SR) nach DIN EN 13201-3:2004 bzw. das nachfolgende Edge-illuminance-ratio (EIR) nach prEN 13201-3:2013 zur Anwendung empfohlen wird [DIN 04] [CEN 13].

2.3 Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit Blendung

Die physiologische Blendung beeinträchtigt im Normalfall elementare Sehfunktionen wie die Sehschärfe oder die hier interessierende Unterschiedsempfindlichkeit. Der Stand der Technik geht davon aus, dass sich das durch Blendlichtquellen in den Augenmedien verursachte Streulicht als Beleuchtungsstärke [Adr 69b], die in etwa der Schleierleuchtdichte (L_s) proportional ist, den Netzhautbildern von Objekt und Hintergrund überlagert (= Komponente der Netzhautaufhellung). Das bewirkt eine Erhöhung der Wahrnehmungsschwelle, womit sich die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle) prinzipiell erhöht, wenn Blendung auftritt.

Das im Auge eintreffende Licht wird wenig in der Hornhaut und im Glaskörper, jedoch viel in der Augenlinse gestreut (Abbildung 3) [Lit 81]. Das Streulicht entsteht außerdem durch eine Reflexion an den Grenzen der Augenmedien und von der Netzhaut. Aufgrund der raumdeckenden Aufhellung des Augeninneren und der damit verbundenen Allgemeinbeleuchtung der Netzhaut erreicht ein schräg einfallendes Streulicht auch die Fovea (Holladayprinzip). Es sei erwähnt, dass sich mit dem Alter die optischen Eigenschaften verschlechtern, wodurch mehr Streulicht entsteht und eine vermehrte physiologische Blendwirkung auftritt [Lit 81].

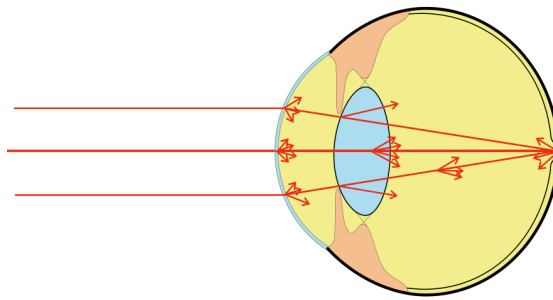


Abbildung 3: Schematische Darstellung vom Streulichtverlauf im Auge (Bild: Ch. Schierz)

Aufgrund der Netzhautaufhellung durch das Streulicht wird einerseits der Adaptationszustand des Auges angehoben (auch physiologischer Effekt der Schleierleuchtdichte genannt) [Nar 77]. Das dazugehörige herkömmliche Modell der Schleierüberlagerung, das sich auf die Beschreibung von gerade noch erkennbaren Unterschiedsschwellen bezieht (exklusive überschwellige Objekte), wird mathematisch nach dem Holladayprinzip wie folgt definiert [Bae 90]:

$$L_{a,h} = L_u + L_s \quad (2)$$

mit:

$L_{a,h}$	Adaptationsleuchtdichte nach Holladay in cd/m^2 ;
L_u	Umgebungsleuchtdichte in cd/m^2 ;
L_s	Schleierleuchtdichte in cd/m^2 .

Die Leuchtdichte des Schleiers L_s addiert sich zur Leuchtdichte der Umgebung L_u . Das führt zu einem Zuwachs der Adaptationsleuchtdichte $L_{a,h}$. Je größer die Blendung und damit die Schleierleuchtdichte sind, umso größer muss die notwendige Unterschiedsschwelle zwischen Objekt und Umgebung sein, um es wahrnehmen zu können [Eck 93]. Abbildung 4 stellt dies zur Verdeutlichung grafisch dar. Ein Objekt auf der Fahrbahn ist ohne Blendung wahrnehmbar, wenn sein tatsächlicher Leuchtdichteunterschied zur Umgebung größer als die Unterschiedsschwelle ohne Blendung ($\Delta L_{\min, \text{oBl}}$) ist. Durch Blendung wachsen die Holladayische Adaptationsleuchtdichte um den Betrag der Schleierleuchtdichte und damit die notwendige Unterschiedsschwelle ($\Delta L_{\min, \text{Bl}}$). Das ohne Blendung noch sichtbare Objekt ($\Delta L > \Delta L_{\min, \text{oBl}}$) wird nicht mehr wahrnehmbar sein: $\Delta L_{\min, \text{oBl}} < \Delta L < \Delta L_{\min, \text{Bl}}$ [Lit 81].

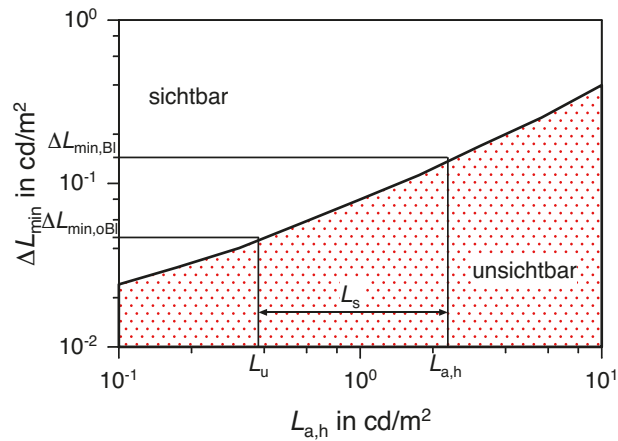


Abbildung 4: Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} als Funktion der Holladayischen Adaptationsleuchtdichte $L_{a,h}$ bzw. der Summe aus Umgebungsleuchtdichte L_u und Schleierleuchtdichte L_s (nach Eckert [Eck 93])

Andererseits vergrößert das Streulicht gleichzeitig auch die scheinbaren Leuchtdichten von Objekt und seiner Umgebung (auch physikalischer Effekt des Schleiers genannt) [Nar 77]. Der zugleich wahrgenommene Kontrast des Bildes gemäß Gleichung (1) wird infolge dieser Wirkung der Schleierüberlagerung geringer [Eck 93], d. h. die Unterschiedsschwelle steigt weiter an, was hingegen im bisherigen *TI*-Modell (basierend auf den Schwellendaten von Adrian [Adr 69a] und Blackwell [Bla 46]) unberücksichtigt bleibt. Dieser Kontrast hat die Gestalt:

$$K_{Bl} = \frac{L_o - L_u}{L_u + L_s} < K \quad (3)$$

mit:

K_{Bl} wahrgenommener Kontrast infolge Blendung;

L_s Leuchtdichte des Schleiers in cd/m^2 .

In der vorliegenden Arbeit soll dieses wesentliche Problem der heutigen Bewertung der physiologischen Blendung gelöst werden. Demzufolge müsste die physiologische Blendwirkung korrekterweise um den Begriff *physikalisch* erweitert und damit „physiologisch-physikalische“ Blendung genannt werden, die die vollständige Schleierwirkung (d. h. den physiologischen und physikalischen Effekt der Schleierleuchtdichte) berücksichtigt.

In Gleichung (2) handelt es sich folglich um eine Definition, die fälschlicherweise allein den Adaptationszustand des Auges bezüglich der bestimmaren Schwelle nach Adrian/Blackwell [Bla 46] [Adr 69a] betrifft (physiologischer Effekt der Schlei-

erleuchtdichte, Komponente der Netzhautaufhellung) und nichts über den Einfluss der zugleich wahrgenommenen Kontrastminderung auf die Schwelle aussagt (physikalischer Effekt der L_s , Komponente der Kontrastminderung). So folgt unter dieser Annahme für Gleichung (2):

$$L_{a,h} = L_u + L_{s,l} \quad (4)$$

mit:

L_u Umgebungsleuchtdichte in cd/m^2 ;
 $L_{s,l}$ physiologischer Effekt der Schleierleuchtdichte infolge Blendung in cd/m^2 .

Für die quantitative Erfassung der physiologischen Blendung wird heutzutage die Adaptationsleuchtdichte $L_{a,h}$ verwendet. In der Beleuchtungspraxis hat sich als starke Vereinfachung für die Umgebungsleuchtdichte die Verwendung der mittleren Fahrbahnleuchtdichte etabliert (siehe Gleichung (7)). Dieser Ersatz soll insofern zulässig sein, als dass der mittlere Adaptationszustand im Wesentlichen durch das zentrale Sehfeld (Größe von etwa 1° bis 2° Winkeldurchmesser) bestimmt wird und als dass keine zu große Schwankung bei der Umgebungsleuchtdichte im Bewertungsfeld auftritt [Eic 70]. Allerdings bleiben dadurch die tatsächliche Ungleichmäßigkeit der Leuchtdichteverteilung im Bewertungsfeld (insbesondere auf nasser Fahrbahn) und ihr örtlich variabler Einfluss auf die Adaptationsleuchtdichte unberücksichtigt. In der vorliegenden Arbeit soll auch dieses Problem gelöst werden. In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, dass im gegenwärtigen *TI*-Berechnungsverfahren nach DIN EN 13201-3 ein weiterer Nachteil insofern innewohnt, als dass es durch eine konstante Beobachtungsgeometrie (Blickrichtung lediglich parallel zur Fahrbahnlängsachse) sowohl die Einzelleuchtdichten und daher Inhomogenitäten im Bewertungsfeld als auch die vom Blickwinkel abhängige Schleierleuchtdichte nur begrenzt bewerten lassen [Wal 14b]. Das kann insbesondere auf nasser Fahrbahn zu deutlichen Fehlurteilen bei der Blendungsbewertung führen.

Die äquivalente Schleierleuchtdichte ($L_{s,\ddot{a}q}$) einer oder mehrerer Blendlichtquellen, die der adaptationsändernden Wirkung am Auge entspricht, wird nach dem von Holladay erarbeiteten Verfahren nach folgender klassischer Gleichung berechnet,

obgleich in Erweiterung dieser Gleichung neue Beziehungen von Vos beispielsweise formuliert wurden [Hol 26] [CIE 76] [Vos 99] [CIE 02] [CEN 13]:

$$L_{s,\ddot{a}q} = k_a \cdot \left(\frac{E_{Bl}}{\theta^2} \right). \quad (5)$$

Darin bedeuten:

$L_{s,\ddot{a}q}$	äquivalente Schleierleuchtdichte in cd/m^2 ;
k_a	altersabhängige Konstante;
E_{Bl}	Blendbeleuchtungsstärke am Auge in lx, Gültigkeitsbereich von 0,1 lx bis 500 lx;
θ	Blendwinkel zwischen der Blendquelle und der Blickrichtung in ° (Grad), Gültigkeitsbereich von 1,5° bis 60°.

Als normatives Maß für die Wirkung der physiologischen Blendung in der Straßenbeleuchtung wird heutzutage das von Eichhoff modifizierte Blendungsmaß von Bouma und Moon/Spencer als die prozentuale Schwellenwerterhöhung verwendet [Bou 36] [Eic 70] [CIE 76]:

$$TI = \left(\frac{\Delta L_{\min,Bl}}{\Delta L_{\min,oBl}} - 1 \right) \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Darin bedeuten:

TI	Schwellenwerterhöhung in %;
$\Delta L_{\min,Bl}$	erforderliche Unterschiedsschwelle mit Blendung in cd/m^2 ;
$\Delta L_{\min,oBl}$	erforderliche Unterschiedsschwelle ohne Blendung in cd/m^2 .

Um aufwendige Berechnungen für den Praktiker mit dieser Gleichung zu vermeiden, wurde von Eichhoff eine Näherungsformel für den Leuchtdichtebereich von $0,05 \text{ cd/m}^2$ bis 5 cd/m^2 (Fall: trockene Straße) angegeben [Eic 70]. Die nachfolgende Gleichung wird in nationalen und internationalen Normen/Richtlinien zur Anwendung empfohlen [CIE 76] [CIE 00] [DIN 04] [CEN 13]:

$$TI = 65 \cdot \frac{L_{s,\ddot{a}q}}{L_m^{0,80}} \%. \quad (7)$$

Darin bedeuten:

TI	Schwellenwerterhöhung in %;
$L_{s,\text{äq}}$	äquivalente Schleierleuchtdichte in cd/m^2 ;
L_m	mittlere Fahrbahnleuchtdichte in cd/m^2 .

Die experimentelle Basis sind breit angelegte und verlässliche Schwellenuntersuchungen von Blackwell [Bla 46] (Sehwinkelgröße 8', Darbietungsdauer 15 s, Adaptationsfeld 20°, Beobachtungswinkel max. 1,4°) und die daraus entwickelten Beziehungen für die Berechnung der Unterschiedsschwelle nach Adrian [Adr 69a]. Die Zusammenhänge zwischen dieser Näherungsformel für die Schwellenwerterhöhung und der äquivalenten Schleierleuchtdichte sowie der mittleren Fahrbahnleuchtdichte sind in Abbildung 5 dargestellt [Eic 70].

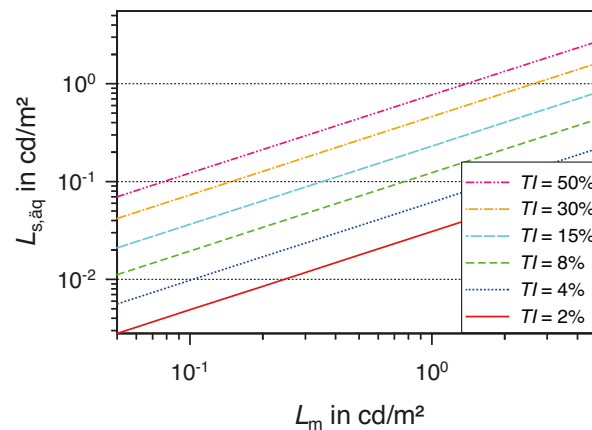


Abbildung 5: Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,\text{äq}}$ als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m für verschiedene Schwellenwerterhöhungen TI (nach Eichhoff [Eic 70])

Zu beachten ist, dass sich die Modellwerte auf eine näherungsweise foveale Beobachtung des Sehobjektes im Gesichtsfeld laut Adrian beziehen, obgleich im Blackwell-Versuch auch leicht extrafoveale Beobachtungswinkel von größer 0,6° benutzt worden sind. Ein TI -Wert basierend auf einer ausschließlich extrafovealen Beobachtung als sicherheitsrelevante Einflussgröße zur verbesserten Reduzierung von Tarnzonen fehlt aber bisher, welches in der vorliegenden Arbeit deshalb behandelt werden soll.

In diesem Zusammenhang sei nochmals darauf hingewiesen, dass die laut DIN EN 13201-3 empfohlene Gleichung (7) für die Berechnung von TI inadäquat auf einer zu großen Darbietungsdauer von 15 s basiert. Mit diesem Wert ergibt sich eine Fehlbewertung der Blendwirkung, weil damit unzumutbare Werte für die Unterschiedsschwelle berücksichtigt werden. Auch insofern ist die gegenwärtige

TI-Blendungsformel zur korrekten Kennzeichnung der physiologischen Blendung nicht geeignet.

3 Erkenntnisstand der Schwellenuntersuchungen

3.1 Leuchtdichteunterschiedsschwelle ohne Blendungsschleier

Über die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle), die *ohne Blendungsschleier* gemessen wird und als Grundlage für die heutige *TI*-Formel dient, liegt eine Vielzahl von früheren Arbeiten vor. Ohne Blendungsschleier heißt, dass die physiologische Wirkung der Schleierleuchtdichte messbar (Komponente der Netzhautaufhellung) aber die physikalische Wirkung der Schleierleuchtdichte (Komponente der wahrgenommenen Kontrastminderung) hingegen nicht messbar ist. Hauptsächlich wurde diese Unterschiedsschwelle für eine große Umgebung (10–20° Durchmesser) untersucht, in welcher ein Sehobjekt mit verschiedenen Größen im positiven Kontrast dargeboten wird. Die Leuchtdichte der Umgebung bewirkt dabei eine alleinige Veränderung der Adaptation (Netzhautaufhellung), ohne dass dabei die scheinbaren Leuchtdichten von Objekt und Hintergrund durch einen Blendungsschleier (Kontrastminderung) gleichzeitig erhöht werden. In neueren Arbeiten befasste man sich mit weiteren Einflussgrößen auf die Unterschiedsschwelle wie z. B. die Darbietungsdauer, Kontrastart oder das Alter des Beobachters.

Ein erstes Berechnungsverfahren für die Unterschiedsschwelle ohne Blendungsschleier wurde 1943 von Berek entworfen [Ber 43]. Seine Funktion basiert auf vorhandenen heterogenen Ergebnissen verschiedener Untersuchungen, die unterschiedliche Bereiche für die Umgebungsleuchtdichte und den Sehwinkel des Objektes untersuchten [Adr 69a].

Ein zweites analytisches Berechnungsverfahren, das bis heute die alleinige Grundlage der *TI*-Formel zur Bewertung der physiologischen Blendung ist, wurde erstmals 1969 von Adrian angegeben. In den 1980ern wurde von ihm das Verfahren durch Einflussfaktoren wie Darbietungsdauer, Kontrastart und Alter erweitert [Adr 93] [Adr 95]. Bei der Grundform stützte sich Adrian auf umfangreiche Schwellenuntersuchungen von Blackwell [Bla 46]. Für seine Messungen der Unterschiedsschwelle ohne Blendungsschleier war der physikalische Effekt der Schleierleuchtdichte ebenfalls nicht messbar, weil eine korrespondierende Situation ohne Schleierleuchtdichte nicht zur Verfügung stand (siehe Testserie-B in Kapitel 3.2). Das Material ist dennoch homogener und verlässlicher als das von Berek verwen-

dete. Die Schwellenversuche wurden bei einer Darbietungsdauer von 15 s und positivem Sehobjektkontrast mit 7 Versuchspersonen unter Verwendung der Konstanzmethode durchgeführt. Die Beobachtung der Testobjekte war nicht vollständig foveal (freier Blick in einem markierten Quadratfeld von 2°), obgleich Adrian die Ergebnisse mit einer fovealen Beobachtung deklarierte. Versuchsparameter waren die Umgebungsleuchtdichte von $0,003 \text{ cd/m}^2$ bis 3000 cd/m^2 und die Sehwinkelgröße von $3,6'$ bis $121'$. Insgesamt lagen 90000 Messpunkte aus den Blackwell-Daten vor [Bla 59] [Adr 69a].

Das daraus von Adrian verbesserte Gesamtmodell wird durch die folgende analytische Funktion beschrieben [Adr 95]:

$$\Delta L_{\min} = k_w \cdot \left(\frac{\sqrt{\phi_r(L_u)}}{\alpha} + \sqrt{L_w(L_u)} \right)^2 \cdot \frac{a_{br}(\alpha, L_u) + t}{t} \cdot F_{CP}(\alpha, L_u) \cdot AF. \quad (8)$$

Darin bedeuten u. a.:

k_w	Faktor für die Wahrnehmungswahrscheinlichkeit;
$\sqrt{\phi_r}$	Lichtstromfunktion, die aus dem Riccoschen Gesetz folgt;
$\sqrt{L_w}$	Leuchtdichtefunktion basierend auf dem Weberschen Gesetz;
α	Sehwinkel in $^\circ$ (Grad);
a_{br}	Blondel-Rey-Konstante;
t	Darbietungsdauer in s;
F_{CP}	Faktor für die Berechnung des negativen Kontrasts;
AF	Faktor zur Berücksichtigung des Alters.

Dabei steht der Faktor k_w für die Wahrnehmungswahrscheinlichkeit. $k_w = 1$ bedeutet 50 % Wahrnehmungswahrscheinlichkeit, und $k_w = 2,6$ steht für 99,99 % [Adr 95], bei der in nahezu 100 % aller Fälle das Sehobjekt wahrgenommen wird. Die von Eichhoff entwickelte Näherungsformel für die Berechnung von TI basiert auf $k_w = 3,1$ [Adr 69a] [Eic 70], das seinerzeit noch als bessere Anpassung an die Be-rek-Daten galt.

Der Klammerausdruck in Gleichung (8) beschreibt die Summe aus zwei Teilfunktionen, die als „Lichtstromfunktion“ ($\sqrt{\phi_r}$) und als „Leuchtdichtefunktion“ ($\sqrt{L_w}$) bezeichnet werden. Die erste Gleichung gibt nach dem Riccoschen Gesetz die Ab-

hängigkeit der Unterschiedsschwelle vom Sehwinkel wieder; die zweite gibt die Abhängigkeit von der Umgebungsleuchtdichte nach dem Weberschen Gesetz wieder.

Die folgende Zeitfunktion $f(t)$ in Gleichung (8) gibt die Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle von der Darbietungsdauer wieder, welche zudem auf dem Sehwinkel und der Adaptationsleuchtdichte beruht. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, steigt die Unterschiedsschwelle bei kleinerer Darbietungsdauer an. Der Kurvenverlauf deutet überdies an, dass größere Darbietungsdauern keine weitere Abnahme der Unterschiedsschwelle erbringen würden [Hen 69]. Der Ausdruck in Gleichung (8) ergibt dann den Wert 1 (Basis: Blackwell-Daten) (Fehlbewertung der Blendung in Kapitel 2.3). Er nimmt hingegen Werte größer 1 an, wenn die Darbietungsdauer unter 2 s fällt.

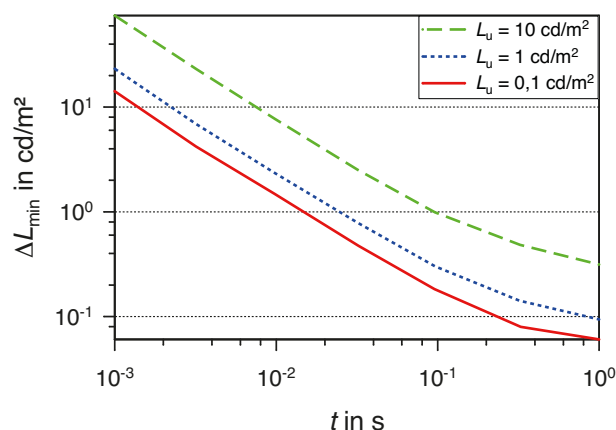


Abbildung 6: Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} eines 4' großen Objektes bei verschiedenen Umgebungsleuchtdichten L_u und der Darbietungsdauer t (berechnet nach Adrian [Adr 95])

Ausgehend von Arbeiten von Narisada kann man davon ausgehen, dass ein Beobachter im Mittel etwa zwischen 0,2 s (Tag) und 0,35 s (Nacht) für die Fixation eines Punktes vor seinem Fahrzeug verwendet [Nar 74]. Es zeigt sich, dass die Fixationsdauer von der Umgebungsleuchtdichte abhängt. Nachts (bei niedriger Adaptationsleuchtdichte) ist sie größer als bei Tag, um so anscheinend die eingeschränkte visuelle Informationsaufnahme zu kompensieren. In Experimenten zur Straßenbeleuchtung wird meist aber der Wert von 0,2 s gewählt [Adr 93], der deshalb bei der vorliegenden Arbeit vorwiegend verwendet werden soll.

Der Faktor F_{CP} in Gleichung (8) steht für den „contrast polarity factor“. Wie aus der Abbildung 7 zu erkennen ist, hängt er von der Sehwinkelgröße und der Umge-

bungsleuchtdichte ab. Dabei ist zu erkennen, dass Sehobjekte mit negativem Kontrast niedrigere Unterschiedsschwellen ergeben [Adr 95]. Der Wert für den Faktor F_{CP} ist gleich 1, wenn das Objekt im Positivkontrast erscheint, sonst ist er kleiner als 1. Die damit verbundene Seherleichterung von Objekten, die im Negativkontrast (der bei der Straßenbeleuchtung von trockenen Straßen angestrebt wird) zu sehen sind, hatte Aulhorn 1963 festgestellt [Aul 64]. Um jedoch den Worst Case aus Sicht der Wahrnehmbarkeitsschwelle und den vorherrschenden Kontrastverhältnissen auf nasser Straße (Kapitel 2.1) bei der vorliegenden Arbeit zu erfassen, soll stets der Positivkontrast im Experiment angewendet werden.

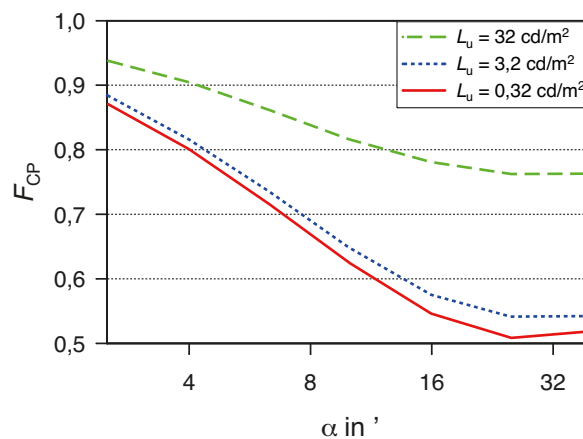


Abbildung 7: Abhängigkeit des Kontrastpolaritätsfaktors F_{CP} von der Umgebungleuchtdichte L_u und vom Sehwinkel α

Der Faktor AF in Gleichung (8) steht für „age factor“ und berücksichtigt den Einfluss des Alters. Es treten verschiedene Effekte auf (z. B. Trübungen der Augenoptik und Zunahme der Streuzentren [Sch 15a]), welche die optischen Eigenschaften des Auges vermindern und daher eine Erhöhung der Unterschiedsschwelle und der Blendempfindlichkeit mit zunehmendem Alter bewirken. Die Abbildung 8 zeigt, dass im jüngeren Alter (20–35 Jahre) dieser Einfluss vernachlässigbar klein ist. Dass sich aber im höheren Alter (ab etwa 65 Jahre) die Unterschiedsschwelle deutlich erhöht, und zwar mindestens um den Faktor 2 oder mehr. Beispielsweise hat ein 75-jähriger Fahrzeugführer etwa den 4-fachen Wert eines 20- bis 35-Jährigen [Adr 95]. Daher soll bei der vorliegenden Arbeit das mittlere Alter der Versuchspersonen bei ca. 25 Jahren liegen, um die Altersabhängigkeit als Störfaktor auszuschließen.

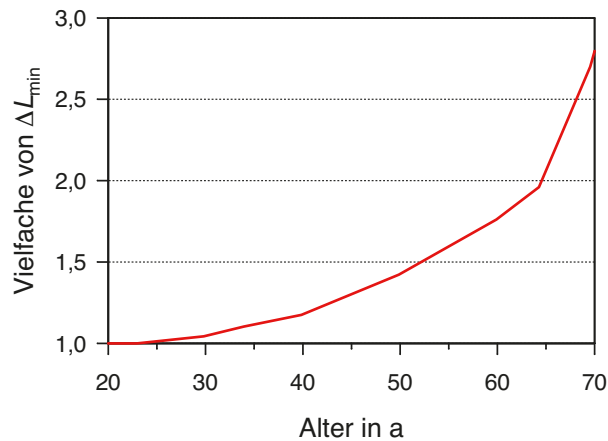


Abbildung 8: Relativer Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} in Abhängigkeit vom Alter (nach Adrian [Adr 95])

Der Vorteil des Berechnungsverfahrens nach Gleichung (8) ist, dass die Einflüsse Umgebungsleuchtdichte, Darbietungsdauer, Kontrastart und Alter berücksichtigt werden. Nachteilig wirkt sich aus, dass der Blendungsfall wiederum mithilfe die Holladayschen Definition für die Adaptationsleuchtdichte verwendet wird, die allein die Netzhautaufhellung des Auges betrifft (physiologischer Effekt der L_s) und nichts über die wahrgenommene Kontrastminderung infolge Blendung (physikalischer Effekt der L_s), die stärker die Schwelle beeinflusst, aussagt [Nar 77]. So folgt unter dieser Annahme für Gleichung (8):

$$\Delta L_{\min} = k \cdot \left(\frac{\sqrt{\phi_r(L_{a,h})}}{\alpha} + \sqrt{L_w(L_{a,h})} \right)^2 \cdot \frac{a(\alpha, L_{a,h}) + t}{t} \cdot F_{CP}(\alpha, L_{a,h}) \cdot AF \quad (9)$$

mit

$$L_{a,h} = L_u + L_{s,l}.$$

Darin bedeuten u. a.:

L_u Umgebungsleuchtdichte in cd/m^2 ;

$L_{s,l}$ physiologischer Effekt der Schleierleuchtdichte infolge Blendung in cd/m^2 .

Die bisherigen Betrachtungen gehen davon aus, dass sich nur das Sehobjekt und die Blendlichtquellen von der Umgebung abheben. Ein erweitertes Verfahren nach

Moon und Spencer [Moo 45], das ebenso auf einer Anwendung der Unterschiedsschwelle ohne Schleier beruht, berücksichtigt wie auch die Studie von Adrian und Eberbach [Adr 69b] zusätzlich die inhomogene Leuchtdichtevertelung der dezentralen Umgebung als weitere Schleierleuchtdichte.

Als dezentrale Umgebung wird hier das ferne Umfeld (von $0,75^\circ$ bis ca. 60° Halbfeldwinkelgröße) eines Sehobjektes verstanden. Man nimmt an, dass durch diesen Umgebungsschleier eine zusätzliche Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte hervorgerufen wird. Wie bereits erwähnt, entsteht ein vergleichbarer Effekt aufgrund des Blendungsschleiers der Blendlichtquellen, deren äquivalente Schleierleuchtdichte den Adaptationszustand ebenso erhöht. Nach Arbeiten von Moon/Spencer kann man die Adaptationsleuchtdichte für ein Gesichtsfeld mit inhomogener Leuchtdichtevertelung folgendermaßen bestimmen [Moo 45]:

$$L_{a,ms} = 0,923 \cdot L_{u,z} + \frac{k_u}{\pi} \int_0^{2\pi} d\eta \int_{0,0131}^1 \frac{L_{u,d}(\theta, \eta)}{\theta^2} \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (10)$$

$$+ k_u \sum_i \frac{E_{Bl,i}}{\theta_i^2}.$$

Darin bedeuten:

$L_{a,ms}$	Adaptationsleuchtdichte nach Moon/Spencer in cd/m^2 ;
$L_{u,z}$	Leuchtdichte der zentralen Umgebung in cd/m^2 ;
k_u	0,000875;
$L_{u,d}(\theta, \eta)$	Leuchtdichte der dezentralen Umgebung in cd/m^2 ;
θ	Blendwinkel in $^\circ$ (Grad);
$E_{Bl,i}$	Beleuchtungsstärke am Auge durch die i-te Blendquelle.

Der erste Summand steht für den Anteil einer Leuchtdichte des zentralen Sehfeldes (bis ca. $1,5^\circ$ Winkeldurchmesser) an der Adaptation. Der zweite Summand beschreibt den Anteil derjenigen Schleierleuchtdichte, die durch die dezentrale Umgebung (von ca. $1,5^\circ$ bis ca. 120° Winkeldurchmesser) verursacht wird. Eine Abschätzung ergibt, dass dieser Umgebungsschleier je nach Größe der Umgebung den Adaptationszustand des Auges zwischen ca. 5 % und 11 % (bei gleichgroßen Leuchtdichten von $L_{u,z}$ und $L_{u,d}$) beeinflusst. Daher ist es nicht sinnvoll, größere Umgebungen als etwa 5° Feldwinkel zu untersuchen, um den Verhältnissen

der Straßenbeleuchtung näherzukommen. Der dritte Summand gibt den bekannten Anteil von der Schleierleuchtdichte seitens der i -ten Blendlichtquelle wieder (Blendungsschleier). Demnach stellt diese Erweiterung eine Verbesserung gegenüber Gleichung (2) von Holladay zur Beschreibung der Adaptationsleuchtdichte dar, weil eine Wirkung der inhomogenen Leuchtdichteverteilung aus der dezentralen Umgebung auf die Adaptationsleuchtdichte mit einberechnet wird, wobei $L_{u,d}(\theta, \eta)$ die Blendquellen nicht enthalten darf [Pah 56].

Hinsichtlich der Gültigkeit der Gleichung (10) zur Ermittlung einer Schwelle auf Basis der Adrian/Blackwell-Daten ist wiederum zu bemerken, dass es sich hierbei um eine Definition handelt, die allein den Adaptationszustand des Auges bzgl. der Aufhellung des Netzhautbildes betrifft (physiologischer Effekt) und nichts über die zugleich wahrgenommene Kontrastminderung infolge des Blendungsschleiers (und daher nichts über den physikalischen Effekt der Schleierleuchtdichte auf den Adaptationszustand) aussagt [Nar 77]. So folgt unter dieser Annahme für Gleichung (10):

$$L_{a,ms} = mL_{u,z} + n(L_{s,d,l} + L_{s,l}). \quad (11)$$

Darin bedeuten u. a.:

m	Konstante;
$L_{u,z}$	zentrale Umgebungsleuchtdichte in cd/m^2 ;
n	Konstante;
$L_{s,d,l}$	physiologischer Effekt der Schleierleuchtdichte infolge der dezentralen Umgebung in cd/m^2 ;
$L_{s,l}$	physiologischer Effekt der Schleierleuchtdichte infolge Blendung in cd/m^2 .

Somit bleibt abschließend festzustellen, dass wie $L_{a,h}$ auch die Adaptationsleuchtdichte $L_{a,ms}$ nach Moon/Spencer lediglich den physiologischen Effekt der Schleierleuchtdichte berücksichtigt. Die Adaptationsleuchtdichte sollte jedoch auch den physikalischen Effekt der Schleierleuchtdichte im Blendungsfall mit einbeziehen. Aus diesem Grund greifen $L_{a,h}$ bzw. $L_{a,ms}$ als Basis für die Bestimmung einer Adaptationsleuchtdichte infolge Blendung zu kurz und sind zur Ableitung der Unterschiedsschwelle für den Blendungsfall und der damit verbundenen TI -Formel nicht

geeignet [Nar 77] [Nar 95]. In diesem Zusammenhang müssten korrekterweise die beiden Adaptationsleuchtdichten $L_{a,h}$ bzw. $L_{a,ms}$ um den Begriff *foveal* erweitert und damit als „foveale“ Adaptationsleuchtdichten bezeichnet und mit der hier definierten Adaptationsleuchtdichte $L_{a,n}$ nach Narisada nicht verwechselt werden (Kapitel 3.2) [Nar 77].

3.2 Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit Blendungsschleier

Über die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle) *mit Blendungsschleier* liegt eine geringe Anzahl von Arbeiten vor. Die Einbeziehung des Schleiers heißt, dass bei einer Schwellenmessung entweder der Schleier durch Blendquellen oder durch ein äquivalentes Schleierfeld, das gleichzeitig als Adaptationsfeld auftritt, verursacht wird und dadurch die scheinbaren Leuchtdichten von Objekt und Hintergrund erhöht werden, was zu einer wahrgenommenen Kontrastminderung führt. Der alleinige Ansatz zur Beschreibung des Verlaufs des sich daraus ergebenden Wertes für die Unterschiedsschwelle wurde erstmals 1977 von Narisada für die Tunnelbeleuchtung formuliert und 1995 für die Straßenbeleuchtung erweitert [Nar 77] [Nar 95].

Sein Modell basiert auf der Grundannahme, dass eine durch die physiologische Blendung erhöhte Schleierleuchtdichte nicht nur eine Netzhautaufhellung des Netzhautbildes verursacht, sondern auch den zugleich wahrgenommenen Kontrast des Sehobjektes verringert. Der Schleier, der dem Sehobjekt überlagert ist, erhöht damit zum einen die foveale Adaptationsleuchtdichte (physiologischer Effekt der Schleierleuchtdichte), und zum anderen die scheinbare Leuchtdichte von Objekt und Hintergrund (physikalischer Effekt der Schleierleuchtdichte) [Nar 77]. Beide Effekte zur Beschreibung einer vollständigen Schleierwirkung lassen die Unterschiedsschwelle im Blendungsfall steigen, die gerade noch wahrnehmbar ist.

Die Abbildung 9 zeigt schematisch die Versuchsanordnung für die Schwellenmessung mit Schleier unter Straßenbeleuchtungsbedingungen (Kapitel 4.2.1). Der Beobachter sieht ein quadratisches Sehobjekt von 10' Kantenlänge, dessen Hintergrundleuchtdichte in einem 1,3° kleinen Kreisfeld auftritt. Die Adaptationsleuchtdichte nach Narisada, die im Experiment gleichzeitig als äquivalente Schleierleuchtdichte fungiert, wurde mittels eines Halbspiegels HS dargeboten, der ein

kreisrundes 3° kleines Leuchtdichtefeld LF (4200 K) eines regulierbaren Lichtkastens LK zwischen Beobachter B und Objekt O abbildet. Es konnten Leuchtdichtestufen zwischen 0,4 cd/m² und 2000 cd/m² eingestellt werden [Nar 77].

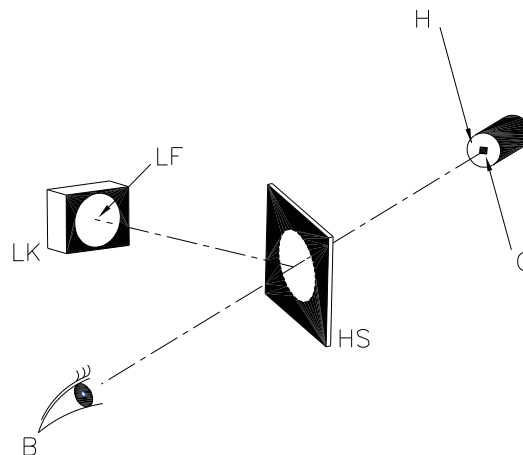


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (nach Narisada [Nar 95])

Der Versuch wurde mit nur einem Beobachter (28 Jahre) durchgeführt. Dieser hatte zu Beginn 30 min Zeit, um sich an die Dunkelheit anzupassen und jeweils etwa weitere 5 min zur Anpassung an eine eingestellte Adaptationsleuchtdichte. Alle 10 s wurde ein foveales Objekt für 0,125 s bei 9-maliger Wiederholung dargeboten (insgesamt 10 Messwerte pro dargebotenem Leuchtdichteunterschied).

Zwei grundlegende Situationen wurden dem Beobachter gezeigt (Kapitel 4.3.1), wie in Abbildung 10 dargestellt. In einer Testserie-A wurde das Sehobjekt durch das Adaptationsfeld bzw. Schleierfeld beobachtet. Der dazugehörige Wert für die Unterschiedsschwelle korrespondiert mit dem physiologischen und physikalischen Effekt der Schleierleuchtdichte:

$$L_{a,n} = L_{a,n,A} = L_{s,l,k}. \quad (12)$$

Darin bedeuten:

$L_{a,n}$	Adaptationsleuchtdichte nach Narisada in cd/m ² ;
$L_{a,n,A}$	Adaptationsleuchtdichte in Testserie-A nach Narisada in cd/m ² ;
$L_{s,l,k}$	physiologischer und physikalischer Effekt der Schleierleuchtdichte infolge Blendung in cd/m ² .

In der Testserie-B hingegen wurde das Sehobjekt kurzzeitig ohne Adaptationsfeld/Schleierfeld gesehen, wobei das Feld dafür jeweils etwa 1 s ausgeschaltet wurde. Der daraus sich ergebende Wert für die Unterschiedsschwelle entspricht dem physiologischen Effekt der Schleierleuchtdichte [Nar 77] [Nar 07]. Dabei wird angenommen, dass:

$$L_{a,n,B} = L_f \quad (13)$$

mit der Annahme:

$$L_f = L_{s,l,k}.$$

Darin bedeuten:

- $L_{a,n,B}$ foveale Adaptationsleuchtdichte in Testserie-B nach Narisada in cd/m^2 ;
- L_f foveale Adaptationsleuchtdichte in cd/m^2 bzgl. eines Durchmessers der Netzhautgrube (Fovea centralis) von max. 5° [Nar 77] [Eck 93].

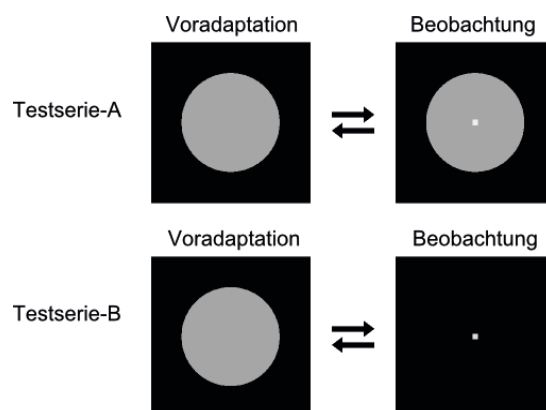


Abbildung 10: Veränderung im Blickfeld des Beobachters bei Testserie-A und Testserie-B (nach Narisada [Nar 07])

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse für beide Testserien. Aus dem Kurvenlauf ist zu erkennen, dass zwischen beiden Schwellenkurven ein erheblicher Abstand besteht. Je größer die eingestellte Adaptationsleuchtdichte und damit die Schleierleuchtdichte sind, desto deutlicher fällt dieser Trend aus. Wie erwartet, ergibt die Testserie-A aufgrund des zusätzlich vorhandenen physikalischen Effektes der Schleierleuchtdichte (Kontrastminderung) deutlich größere Schwellenwerte als die Testserie-B [Nar 77].

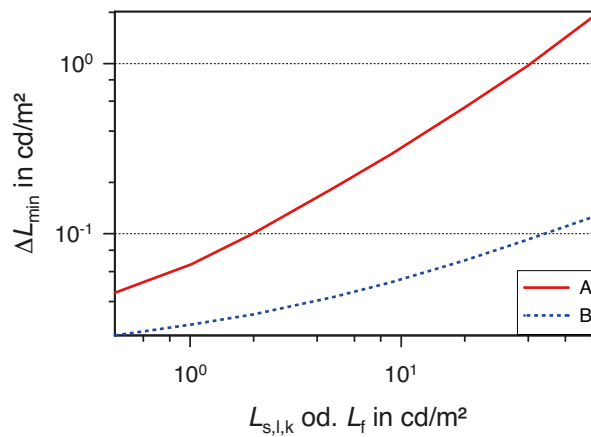


Abbildung 11: Verlauf der Schwellenkurven ΔL_{\min} in Abhängigkeit von den Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ (Kurve A) bzw. L_f (Kurve B) (nach Narisada [Nar 77])

Zur Berechnung des Wertes für die Unterschiedsschwelle, der allein durch den Schleier der Kontrastminderung erzeugt wird (physikalischer Effekt), wird eine Subtraktion zwischen den Schwellenkurven der Testserie-A (Kurve A) und Testserie-B (Kurve B) durchgeführt, die eine Schwellenkurve C ergibt (Abbildung 12). Hieraus ergibt sich die Gleichung:

$$\Delta L_{\min,C}(L_{s,k}) = \Delta L_{\min,A}(L_{s,l,k}) - \Delta L_{\min,B}(L_f) \quad (14)$$

mit

$$L_{s,k} = L_{s,l,k} = L_{s,f}.$$

Darin bedeuten u. a.:

$\Delta L_{\min,C}$	Unterschiedsschwelle der Kurve C in cd/m^2 ;
$\Delta L_{\min,A}$	Unterschiedsschwelle der Kurve A in cd/m^2 ;
$\Delta L_{\min,B}$	Unterschiedsschwelle der Kurve B in cd/m^2 ;
$L_{s,k}$	physikalischer Effekt der Schleierleuchtdichte in cd/m^2 .

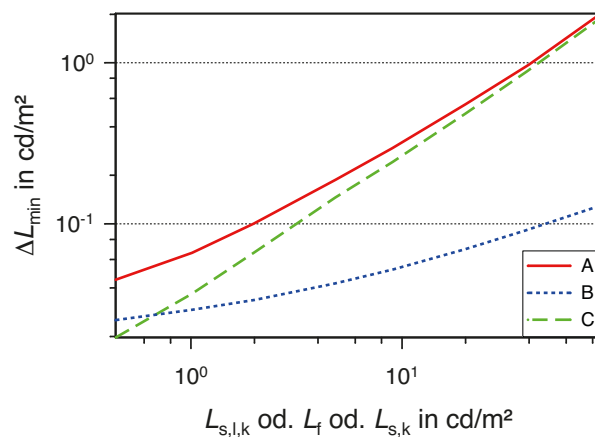


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} und den Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ (Kurve A) bzw. L_f (Kurve B) sowie zwischen der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} und der Leuchtdichte $L_{s,k}$ (Kurve C), die dem rein physikalischen Effekt entspricht (nach Narisada [Nar 77])

Bemerkenswert sind der relativ flache Verlauf von Kurve B im Vergleich zum steilen Anstieg von Kurve C, welcher auf die nicht zu vernachlässigbare physikalische Wirkung des Schleiers auf die Objektwahrnehmung bzw. auf den Gesamtschwellenwert im Blendungsfall hindeutet [Nar 95]. Das zeigt, dass die Komponente der Kontrastminderung (Kurve C) deutlich stärker als die Komponente der Netzhautaufhellung (Kurve B) die Unterschiedsschwelle bei Blendung beeinflusst.

Hierbei kann die Leuchtdichte L_f (Kurve B) als die mittlere Fahrbahnleuchtdichte laut Narisada vermutet werden [Nar 95]. Weil ein Fahrzeugführer unter Straßenbeleuchtungsbedingungen keinen Unterschied zwischen der Schleierleuchtdichte seitens der Blendlichtquelle und der Hintergrundleuchtdichte in Blickrichtung im Bewertungsfeld macht, kann des Weiteren die Summe aus beiden Einflussgrößen der Leuchtdichte $L_{s,k}$ (Kurve C) gleichgesetzt werden [Nar 95]. Damit ist es möglich, aus den beiden Teilwerten für die Unterschiedsschwellen $\Delta L_{\min,B}$ und $\Delta L_{\min,C}$ für die Parameter L_m und $(L_s + L_h)$ einen Gesamtwert für die Unterschiedsschwelle für inhomogene Leuchtdichteverteilungen im Blendungsfall zu bestimmen (Abbildung 50 in Kapitel 6.3), welcher die wahrgenommene Kontrastverflachung infolge des Blendungsschleiers als stärkere Komponente mit einbezieht [Wal 12]. In diesem Zusammenhang sei bemerkt, dass eine Berechnung des Schwellenwertes, der bei inhomogener Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld entweder nur auf L_m oder L_h basieren würde, zu deutlichen Fehlern führt [Völ 06].

3.3 Einfluss der Darbietungsart

Neben den bisher diskutierten Einflüssen auf die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle), die sich auf die foveale Darbietung eines Sehobjektes beziehen, treten Unterschiede auf, wenn die Darbietungsart von foveal auf extrafoveal wechselt. Grundsätzlich beginnt das extrafoveale oder periphere Sehen außerhalb der Foveola, die den Bereich des zentralen Sehens (foveales Sehen) im innersten Teil der Netzhaugrube umfasst. Der Durchmesser der Foveola wird mit $1^{\circ}20'$ angegeben [Eck 93].

Der Einfluss der Exzentrizität bzgl. Blickrichtung wird in der Praxis als ein Einflussfaktor des sogenannten Praxisfaktors („field factor“) beschrieben [Hen 69]. Der in der Literatur verwendete Begriff der Unerwartetheit des Auftretens von Sehobjekten bzw. Hindernissen („expected“ versus „unexpected“) ist mit der extrafovealen Darbietungsart vergleichbar [Hen 69] [Adr 95] [Nar 95] und führt zu einer weiteren Erhöhung der Unterschiedsschwelle.

Der Einfluss der Exzentrizität bzgl. Blickrichtung ist generell von Bedeutung, weil im Straßenraum Hindernisse nicht nur foveal zu detektieren sind. Einerseits treten Hindernisse an nicht vorher bekannten Orten im Sehfeld des Fahrzeugführers auf. Andererseits muss er in der Lage sein, seitliche oder unterhalb der Blickrichtung unerwartet auftretende Hindernisse zu detektieren [Adr 93]. Es ist zu erwarten, dass dadurch der extrafoveale Wert für die Unterschiedsschwelle höher ist als der foveale. Denn ein extrafoveal auftretendes Sehobjekt ist schwerer zu detektieren als ein foveales, weil die Riccoschen Flächen größer werden. Unter diesen Umständen stellt sich in der vorliegenden Arbeit die Frage, welche Erhöhung der Unterschiedsschwelle bei extrafovealen Objekten zu berücksichtigen ist.

Adrian konnte 1993 in seiner Arbeit unter Laborbedingungen zeigen, dass durch eine extrafoveale Darbietung der extrafoveale Wert für die Unterschiedsschwelle im Vergleich zum fovealen Wert größer wird. Das Verhältnis zwischen dem extrafovealen und fovealen Wert wird als Verhältnis R („ratio“) bezeichnet. Die Versuche wurden von 3 Beobachtern im unteren Sehfeld durchgeführt. Folgende Versuchsparameter wurden eingestellt: Umgebungsleuchtdichte $L_u = 0,05 \text{ cd/m}^2$, $0,5 \text{ cd/m}^2$ und $2,7 \text{ cd/m}^2$; Sehwinkel des Objektes $\alpha = 8'$, $12'$, $23'$ und $46'$; Darbietungsdauer $t = 0,2 \text{ s}$; Winkelrichtung $\gamma = 0^{\circ}$ (Horizontale), 30° , 60° und 90° nach unten und Ex-

zentrität (β) von 0° foveal bis 30° extrafoveal. Die verschiedenen Sehwinkelgrößen wurden den Beobachtern in acht extrafovealen β -Winkelrichtungen entlang der vier γ -Winkelrichtungen statistisch verteilt dargeboten [Adr 93].

Ausgehend von den Messergebnissen entwickelte Adrian eine Gleichung für das Verhältnis $R = f(L_u, \alpha, \gamma, \beta)$. Dabei erhielt er eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten bis zu einer Exzentrizität von etwa $\beta = 15^\circ$. Für die Näherungsgleichung (gültig für $0,05 \text{ cd/m}^2 < L_u < 2,7 \text{ cd/m}^2$) wird folgende Gleichung angegeben:

$$R = \frac{\Delta L_{\min, \beta > 0}}{\Delta L_{\min, \beta = 0}} \quad (15)$$

mit

$$R = T(\alpha, c) \cdot (1 + a(1 - e^{-b\beta}) + c\beta^d).$$

Darin bedeuten:

R	Verhältnis zwischen extrafovealem und fovealem Wert für die Unterschiedsschwelle;
α	Sehwinkelgröße in ' (gültig für $8' < \alpha < 46'$);
β	Exzentrizität in $^\circ$;
γ	von der Horizontale nach unten gemessener Winkel in $^\circ$.
T	$T(\alpha, c) = 10^{-2,2625 \cdot c(\alpha - 23)}$;
a	$a = -9,78 \cdot 10^{-5}(\gamma - 112,361)^2 + 0,1719(\log L_u) + 1,506$ $\cdot 10^{-5}(\log L_u) \cdot (\gamma - 112,361)^2 + 2,98$;
b	$b = 1,2595(\log L_u + 1,306)^{0,3833} \cdot (-0,00094\gamma + 0,222)$;
c	$c = 1,11 \cdot 10^{-6}(10^{2,447 \cdot 10^{-3}\gamma + 0,5406 \log L_u + 0,676})$;
d	$d = (1,16 \cdot 10^{-3}\gamma + 0,9159) \cdot (3,689 \cdot 0,0769^{0,033 + \log L_u})$.

Abbildung 13 zeigt die Kurven für verschiedene Exzentrizitäten und Winkelrichtungen. Wie man aus den Kurvenverläufen ersehen kann, steigt das Verhältnis R mit zunehmender Exzentrizität und Abweichung von der horizontalen Winkelrichtung. Demnach lässt sich für eine zweistreifige Fahrbahn bzw. typische Hauptverkehrsstraße ($L_m = 2,7 \text{ cd/m}^2$, $\alpha = 23'$, $\beta = 2^\circ$) abschätzen (Exzentrizität im Versuch: Kapi-

tel 4.2.3), dass sich der foveale Wert der Unterschiedsschwelle etwa um den Faktor 2 erhöhen würde.

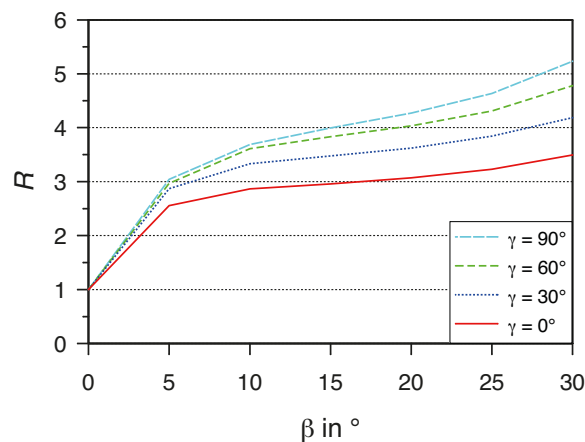


Abbildung 13: Verhältnis R für verschiedene Blickrichtungen β mit den Winkelrichtungen $\gamma = 0^\circ$, 30° , 60° und 90° im unteren Sehfeld (nach Adrian [Adr 93])

Den Einfluss der Umgebungsleuchtdichte auf die Schwellenerhöhung zeigt Abbildung 14. Vergleicht man die R -Werte, so kann man erkennen, dass sich diese für wachsende Leuchtdichten vergrößern. Der im vorstehenden Beispiel abgeschätzte Faktor wäre auf etwa 1,7 zu reduzieren, wenn die Leuchtdichte $0,2 \text{ cd/m}^2$ beträgt. Vereinfachend wird in der praktischen Beleuchtungstechnik die Abhängigkeit von der Leuchtdichte aber vernachlässigt und üblicherweise ein Faktor bzw. Praxisfaktor nach dem Worst-Case-Prinzip empfohlen, was bedeutet, dass demnach der größere Faktor von 2 angewendet werden sollte.

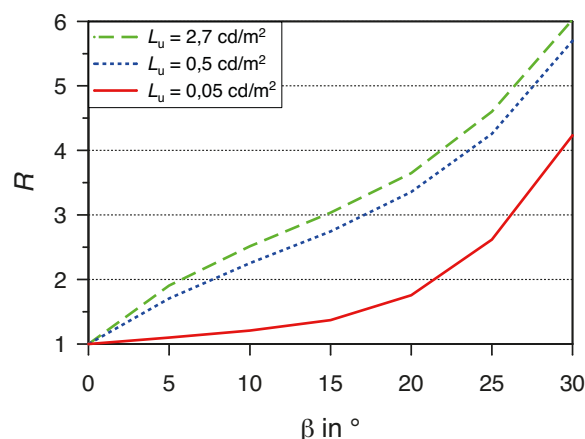


Abbildung 14: Verhältnis R für verschiedene Umgebungsleuchtdichten L_u mit dem Sehwinkel $\alpha = 23'$ und der Winkelrichtung $\gamma = 0^\circ$ (nach Adrian [Adr 93])

Hentschel konnte bereits 1969 mit einer Laboruntersuchung zeigen, dass sich der Wert für die Unterschiedsschwelle bei extrafovealer Darbietungsart im unteren und

oberen Sehfeld erhöht. Diese Erhöhung ist zudem abhängig vom Leuchtdichteniveau. Die Versuche wurden von 15 Beobachtern durchgeführt. Ein Sehobjekt von $10'$ Sehwinkelgröße tauchte an einer beliebigen Stelle (entspricht ansatzweise der Unerwartetheit) auf einem Kreis von 4° Durchmesser (d. h. $\beta = 2^\circ$) statistisch verteilt auf (Exzentrizität im Versuch: Kapitel 4.2.3). Dabei wurden Umgebungsleuchtdichten von $0,5 \text{ cd/m}^2$, 1 cd/m^2 oder 2 cd/m^2 und Darbietungsdauern von $0,12 \text{ s}$, $0,2 \text{ s}$ und 1 s verwendet. Das Sehobjekt wurde inmitten einer Fahrbahn von einer Großbildaufnahme einer Straßenbeleuchtungslage eingeblendet [Hen 69].

Abbildung 15 zeigt die Veränderung des Wertes für die Unterschiedsschwelle zwischen fovealer und extrafovealer Sehobjektdarbietung (Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von $0,9$). Die untere Kurve basiert auf Messwerten bei fovealem und die beiden oberen bei extrafovealem Sehobjekt. Die Kurven verdeutlichen, dass die Schwellenerhöhung mit dem Leuchtdichteniveau zunimmt. Für den Bereich der auf trockener Straße vorkommenden Leuchtdichten von $0,5 \text{ cd/m}^2$ bis 3 cd/m^2 lässt sich daraus eine Erhöhung von etwa um den Faktor 2 bis 4 ablesen [Hen 69].

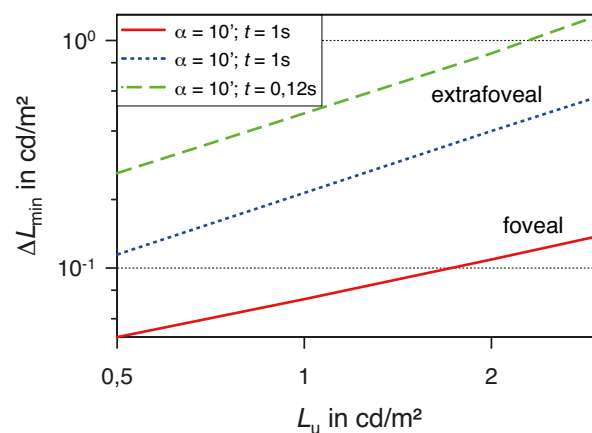


Abbildung 15: Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte L_u und Darbietungsart (foveal, extrafoveal) des Sehobjektes mit $\alpha = 10'$ und $t = 1 \text{ s}$ bzw. $0,12 \text{ s}$ (nach Hentschel [Hen 69])

Ausgehend von Untersuchungen von Roper/Howard kam Narisada zu dem Schluss, dass man bei der Sehleistung bei Dunkelheit im Straßenverkehr vom peripheren (d. h. extrafovealem) Sehen ausgehen sollte. Die lichttechnische Dimensionierung einer Straßenbeleuchtungsanlage sollte deshalb immer den Praxisfaktor einberechnen, um so die Tarnzonen zu verkleinern und das Sichtbarkeitsfeld zu vergrößern. Nach seiner Abschätzung ist ein Praxisfaktor von 3 für die ortsfeste Straßenbeleuchtung zu verwenden [Nar 03].

3.4 Zusammenfassung und Hypothesen

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Die umfangreichen analytischen Arbeiten von Adrian basieren methodisch auf einem Ansatz der Messung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ohne Blendungsschleier (physiologischer Effekt). Genauso basiert der Ansatz von Moon/Spencer auf der Schwellenmessung ohne Schleier. Er erweitert jedoch die Berechnung der Adaptationsleuchtdichte um eine zusätzliche Schleierleuchtdichte der dezentralen Umgebung und gewichtet den Einfluss der zentralen Umgebungsleuchtdichte neu. Das bedeutet, dass beide Verfahren die Unterschiedsschwelle lediglich ohne den wichtigen physikalischen Effekt der Schleierleuchtdichte für den Blendungsfall berechnen lassen. Die Wahrnehmung von Sehobjekten bei physiologischer Blendung unterliegt jedoch nicht nur einer adaptationssteigernden, sondern auch einer zugleich wahrgenommenen Kontrastminderung, die hierbei aber unberücksichtigt bleibt, obgleich sie die Schwelle stärker beeinflusst. Aus diesem Grund ist es offensichtlich, dass die weit verbreitete Formel von Adrian und die Formel von Moon/Spencer zu kurz greifen und für die Ermittlung der Schwellenwerterhöhung TI infolge Blendung nicht korrekt angewendet werden können.

Im Gegensatz dazu ist die Grundidee des Schwellenmodells nach Narisada weiterführend, denn sie berücksichtigt auch den physikalischen Effekt der Schleierleuchtdichte für die Ermittlung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle. Damit ist gewährleistet, dass die stärkere Komponente der Kontrastminderung für den Blendungsfall einbezogen werden kann und somit die Ermittlung der Schwellenwerterhöhung TI korrekter quantifizierbar ist.

Die Exzentrizität bzgl. Blickrichtung nimmt Einfluss auf die Leuchtdichteunterschiedsschwelle. Sie ist bei der Schwellenbestimmung von Bedeutung, weil nicht nur im zentralen sondern auch im peripheren Sehfeld des Fahrzeugführers kritische Hindernisse unerwartet auftreten können. Um die Tarnzonen zu verkleinern, das Sichtbarkeitsfeld zu vergrößern und damit auch extrafoveale Sehobjekte detektierbar zu machen, sollte eine Erhöhung der fovealen Unterschiedsschwelle mithilfe der extrafovealen einbezogen werden. Das Schwellenmodell nach Adrian existiert sowohl für foveale als auch für extrafoveale Detektion, wenngleich die Berechnungsdaten nach Gleichung (8) nicht ausschließlich die foveale Unterschieds-

schwelle für die gegenwärtige *TI*-Formel verwenden. Im Gegensatz dazu liegt das Schwellenmodell (mit Blendungsschleier) nach Narisada allerdings nur für die foveale Detektion bislang vor.

Aus dem oben dargestellten Kenntnisstand der Schwellenuntersuchungen ohne und mit Blendungsschleier ergeben sich offene Fragen. Diese führen zu den folgenden zu untersuchenden Hypothesen:

- Das Schwellenmodell nach Narisada ist geeignet, die vollständige Schleierwirkung infolge Blendung zu erfassen.
- Das Schwellenmodell nach Adrian ist nicht geeignet, den Einfluss der Darbietungsdauer beim Schwellenmodell nach Narisada vorherzusagen.
- Die Erweiterung des Schwellenmodells nach Narisada auf die extrafoveale Beobachtung ergibt eine Schwellenerhöhung.
- Die Schwellenbestimmung nach Narisada ergibt alle Basisdaten, die für eine korrektere Bewertung der physiologischen Blendung unter Berücksichtigung einer vollständigen Schleierwirkung notwendig sind.

4 Methodik

4.1 Versuchsmethode

Die informativste (aber auch aufwendigste) Methode zur Bestimmung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ist die Konstanzmethode [Gui 54], die in den Versuchsreihen angewandt wurde. Hierbei werden gleichartige Einzelreize mit unterschiedlich großem Leuchtdichteunterschied in zufälliger Reihenfolge dargeboten, um Habituations- oder Erwartungsfehler zu vermeiden. Jeder der unter- und überschwelligen Einzelreize wird mehrmals präsentiert. Dabei antwortet die Versuchsperson dann mit Ja, wenn sie glaubt, ein Testobjekt detektiert zu haben; ansonsten antwortet sie mit Nein.

Das Antwortverhalten der Versuchsperson bei einer Schwellenmessung wird auch von Faktoren wie Müdigkeit und/oder Motivation beeinflusst. Wenn eine Versuchsperson unsicher ist, zeigt sie eine bestimmte Antworttendenz, die herausgerechnet werden sollte, um die tatsächliche Detektionsleistung zu ermitteln. Die Detektionsaufgabe wird somit in dieser Arbeit mithilfe der Signaldetektionstheorie definiert [Sch 13].

In den Versuchsreihen wurden deshalb zusätzlich sogenannte Catch Trials einbezogen, um die mögliche Reaktionsneigung bzw. Antworttendenz der Versuchsperson herauszufinden, wenn sie unsicher ist. Diese Versuche sind Einzelreize mit der Intensität Null (d. h. $\Delta L = 0 \text{ cd/m}^2$) und ermöglichen eine Korrektur der Reaktionsneigung, die von der eigentlichen Leistungskomponente somit getrennt wird.

Durch diese klassische Messmethode entsteht als Messergebnis eine psychometrische Funktion pro Test und Versuchsperson, die meist s-förmig verläuft. Abbildung 16 zeigt zur Verdeutlichung einen typischen s-förmigem Kurvenverlauf der Messung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle). Als Wert für die Unterschiedsschwelle (analog zum Schwellenwert) wird diejenige Reizintensität verwendet, bei der in 50 % der Fälle ein Sehobjekt detektiert wird ($p_{\text{Detektion}} = 0,5$).

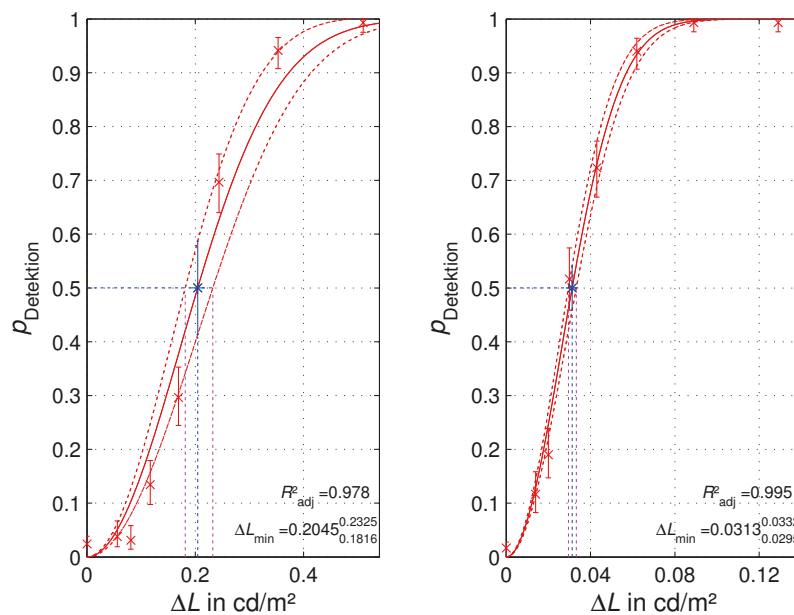


Abbildung 16: Schwellenwertbestimmung mittels Konstanzmethode: s-förmige Antwortkurve einer Versuchspersonengruppe für die Detektion verschiedener Leuchtdichteunterschiede (Reizintensitäten) bei der Testserie-A (linke Kurve) und Testserie-B (rechte Kurve)

4.2 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen zur fovealen und extrafovealen Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit und ohne Blendungsschleier wurden an einem abstrakten Straßenmodell in einem störungsfreien, fensterlosen Raum durchgeführt. Der eigene Versuchsaufbau erlaubte die Simulation von verschiedenen Versuchsparametern.

4.2.1 Versuchsapparatur

Die prinzipielle Versuchsapparatur zeigen Abbildung 17 und Abbildung 18. Sie bestand aus einer Haupt- und einer Nebenkammer, die beide mit einem schwarzen lichtundurchlässigen Stoff zur Reduzierung von etwaigem Fremd- und Streulicht ausgekleidet waren. In der Hauptkammer selbst befanden sich eine Projektionswand und zwei verdeckte Projektoren. Die kleinere schwarze Nebenkammer mit Sichtfenster diente als Versuchspersonenstand.

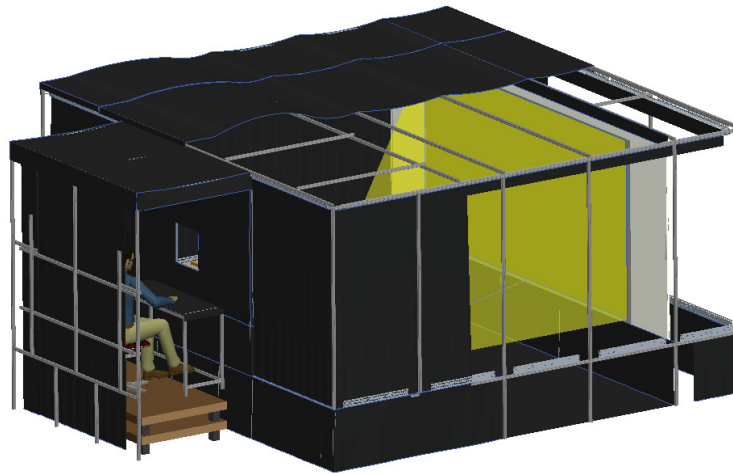


Abbildung 17: Schematischer Aufbau der autonomen Versuchsanordnung



Abbildung 18: Ansicht der Versuchsanordnung mit Versuchsleiter (rechts sitzend) und Versuchsperson (links sitzend). Im Versuch sind die Haupt- und Nebenkammer vollständig mithilfe des schwarzen Stoffes geschlossen (Foto: I. Herzog)

Die Versuchsperson blickte aus einer Entfernung von ca. 4 m auf eine ebene vertikale Projektionswand, auf der alle Testreize dargeboten wurden. Diese bestand aus einer grauen Auf- und Rückprojektionsfolie („Studio“, Firma Gerriets) mit einem mittleren Leuchtdichtefaktor (0,31 bzw. 0,24), guter Farbneutralität und nicht glänzendem Reflexionsverhalten, wodurch die gewünschte Richtungsunabhängigkeit der Leuchtdichte bei der Projektion von fovealen und extrafovealen Objekten annähernd erzielt wird.

Zur experimentellen Messung des Wertes für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit äquivalenten Blendungsschleier ist im Gegensatz zur Versuchsanordnung

von Narisada (Abbildung 9 in Kapitel 3.2) das Adaptationsfeld nicht mithilfe eines Halbspiegels als Schleier dargeboten worden, sondern mithilfe einer Aufprojektion. Diese Überlagerung ergibt ein Schleierfeld, das bei der Darbietung über das Objekt projiziert wird.

Es sind dazu zwei Projektoren verwendet worden. Beide Projektoren waren unterhalb und mittig vor der Projektionswand angeordnet (Abbildung 19). Projektor 1 (PT-DZ6700EL, Firma Panasonic) lieferte das Adaptationsfeld/Schleierfeld in einem gegebenen Kreisfeld mit bestimmter Winkelgröße als Aufprojektion. Dieser Projektor bat auch einen roten Fixationspunkt von einer Sehwinkelgröße von 5' zentral an. Projektor 2 (DLA-RS45E, Firma JVC) lieferte hingegen das Testsehobjekt konstanter Größe (10') mit angeschlossenen kreisrunden Hintergrundfeld.



Abbildung 19: Ansicht der Aufstellung der beiden Projektoren mit getrennten Filterstufen. Projektor 1 befindet sich in der oberen, Projektor 2 in der unteren Position (Foto: I. Herzog)

Zur Durchführung der Schwellenmessung waren beide Projektoren mit verschiedenen Graufilterstufen („Neutral Density“, Firma LEE Filters) ausgestattet, um das photometrische Auflösungsvermögen innerhalb der vier Leuchtdichtestufen ($0,20 \text{ cd/m}^2$, $1,0 \text{ cd/m}^2$, $5,0 \text{ cd/m}^2$, 25 cd/m^2) zu vergrößern. Damit ergibt sich eine höhere Einstellgenauigkeit bei der Einmessung der Zielwerte für die Leuchtdichte und Lichtfarbe hinsichtlich Testschleier, Testsehobjekt und Testhintergrund.

4.2.2 Versuchssteuerung

Die gesamte Versuchssteuerung erfolgte durch einen Steuer-Laptop (Latitude E6320, Firma Dell). Die Steuerung ermöglichte einen teilautomatisierten Versuchsablauf, wodurch die Retest-Stabilität der einzelnen Versuche gesteigert wird. (Abbildung 20) [Ueb 11] [Wal 12]. Einerseits wurde mit dem Laptop ein Video-PC (Celsius W410, Firma Fujitsu) getriggert, von welchem aus die entsprechenden Bildinhalte (Testobjekt, Adaptationsfeld/Schleierfeld) auf die Projektoren übertragen wurden. Die jeweiligen Zeitpunkte für das Zu- und Abschalten der Testbilder übernahm eine Video-Software („Pandoras Box Player“, Firma Coolux).

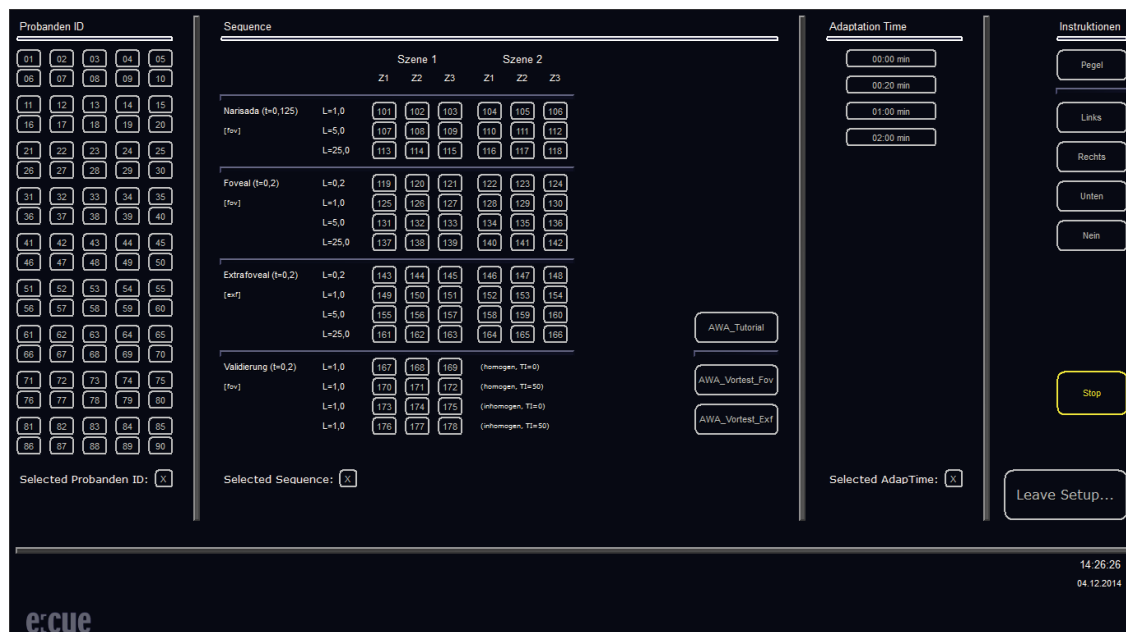


Abbildung 20: Ansicht der Bildschirmoberfläche des Steuer-Laptops für die Auswahl eines Tests

Der Steuer-Laptop diente ebenso zur Messwerterfassung, welcher die Antworten einlas. Dabei war eine akustische Führung der Versuchsperson vorgesehen, damit sie stets nachvollziehen konnte, ob und welche ihrer Antworten vom System erfasst werden, womit ungewollte Fehlantworten oder Nichtantworten („Abbruch“) noch korrigiert werden konnten (Abbildung 21). Zudem wurde vom Steuer-Laptop immer ein akustisches Signal gegeben, wenn ein Testobjekt oder ein leeres Testobjekt (Catch Trial) auftauchte.

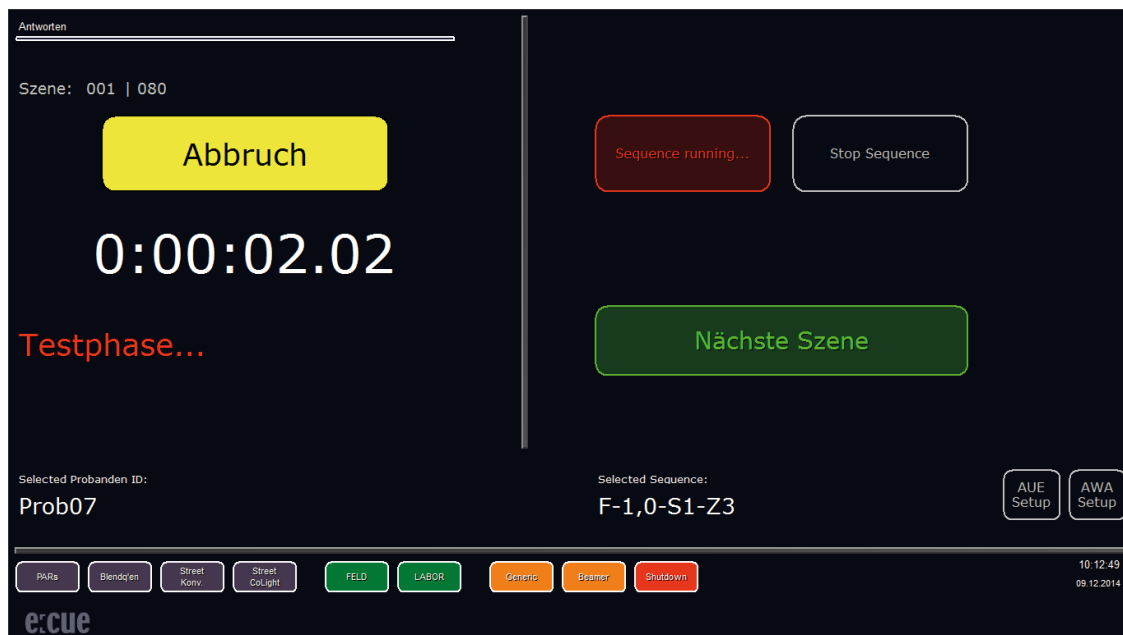


Abbildung 21: Ansicht der Bildschirmoberfläche des Steuer-Laptops beim Fall „Abbruch“

Die zufällige Auswahl der Testobjektdarbietung geschah über den Video-PC. Hier lag eine begrenzte Anzahl von Testdateien zu den jeweiligen Versuchsreihen vor, die mithilfe eines Zufallsgenerators vorher erstellt worden sind. Die randomisierte Wahl einer Testdatei wurde vor Versuchsbeginn ebenso mithilfe eines Zufallsgenerators festgelegt.

Für die photometrische Kalibrierung der beiden Projektoren ist der Video-PC mit oben genannter Software verwendet worden. Dazu wurden die schwächsten Filterstufen und maximale Bildgröße mit Weißbild eingestellt, um die Genauigkeit zu erhöhen. Wie Abbildung 22 zeigt, ließ sich die vertikale Beleuchtungsstärke an einem Referenzpunkt mit einem Beleuchtungsstärkemessgerät hinter der Projektionswand bestimmen und mit dem Sollwert vergleichen (Pocket Lux 2 B, Firma LMT). Eine maximale Abweichung von 5 % vom Zielwert war zulässig. Bei Überschreiten dieser Streugrenze konnte mithilfe der Video-Software durch Veränderung eines sogenannten Opazitätswertes in der betroffenen Testdatei die unzulässige Abweichung zeitnah korrigiert werden.



Abbildung 22: Ansicht der Anordnung des separaten Photometerkopfes zur Kalibrierung. Weiter oben im Bild das kreisförmige Adaptationsfeld/Schleierfeld mit Fixationspunkt (Foto: I. Herzog)

Für die örtliche Kalibrierung der beiden Projektoren sind zwei Farbkreuze (grün und rot) verwendet worden. Als Vorgabe für den Abgleich wurde ein vom Versuchsstand räumlich entkoppelter Laser im Zentrum durch Rückprojektion von hinten auf die Projektionswand abgebildet. Die fixierte Position des Laserpunktes entsprach dem Durchstoßpunkt der lotrechten Beobachtungsrichtung aus Sicht der Versuchsperson und ist daher mit der Lage des Fixationspunktes identisch. Wenn das Farbkreuz des einen Projektors mit dem Farbkreuz des anderen Projektors deckungsgleich auf den Laserpunkt zentriert war, entstand farbmischend ein gelbes Farbkreuz, dessen Kreuzpunkt auf dem roten Laserpunkt stand (Abbildung 23).

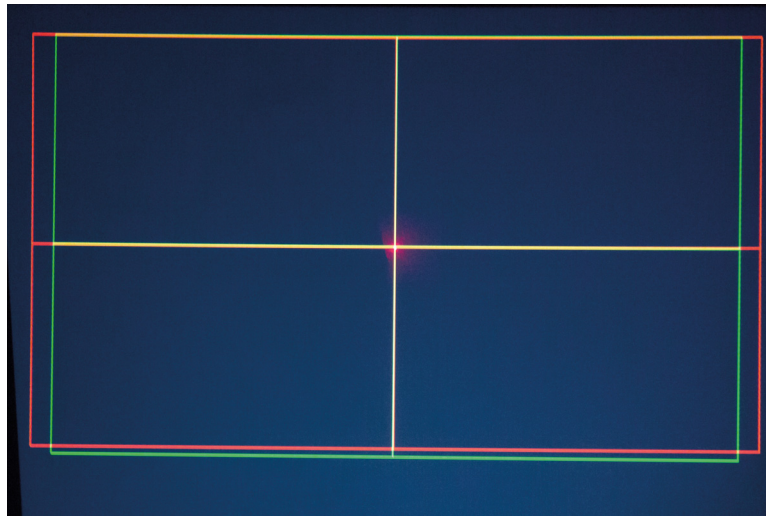


Abbildung 23: Ansicht der örtlichen Kalibrierung der beiden Projektoren (Projektor 1 mit rotem und Projektor 2 mit grünem Farbkreuz) und rotem Laserpunkt im Zentrum (Foto: I. Herzog)

4.2.3 Versuchsbedingungen

Die zu realisierenden Versuchsbedingungen betraf das quadratische Testsehobjekt mit kreisrundem Hintergrundfeld (Projektor 2) und das diesem überlagerte kreisrunde Adaptationsfeld (Projektor 1), welches gleichzeitig als Schleierfeld funktionierte. Das Ziel dabei war, standardisierte Bedingungen zu erreichen, die der Praxis der ortsfesten Straßenbeleuchtung gut entsprechen. Dadurch wird die Generalisierbarkeit bzw. Praxistauglichkeit der Ergebnisse verbessert.

Die Versuchsperson beobachtete beidäugig alle Testreize aus einer für Laborverhältnisse relativ großen Entfernung von etwa 4 m. Damit war das Auge der Versuchsperson fernakkommodiert, wodurch man den praktischen Beobachtungsbedingungen des Fahrzeugführers näherkommt [Adr 65].

Innerhalb eines jeden Tests hatte die Versuchsperson bei binokularer Beobachtung (wobei die Augenhöhe durch eine Stirn- und Kinnstütze fixiert war) einen roten Fixationspunkt konstant anzublicken, um einen stabilen Adaptationszustand und eine reproduzierbare Beobachtung zu etablieren. Die Winkelgröße des Fixationspunktes lag bei leicht erkennbaren 5'.

In Anlehnung an die Untersuchungen nach Narisada wurde ein 10' großes Testobjekt mit Positivkontrast verwendet [Nar 77], was typischerweise die kritische Sehwinkelgröße eines Fahrzeugführers beschreibt (Worst Case bzgl. Sehwinkel: Kapi-

tel 2.2). Das entspricht in etwa einer kritischen Haltesichtweite von 70 m an einer anbaufreien Hauptverkehrsstraße (bei einer Straßenlängsneigung von max. -8 % und einer gefahrenen Geschwindigkeit von 60 km/h). Wie Abbildung 24 zeigt, umgab das quadratische Testobjekt ein kreisrundes Hintergrundfeld, dessen Leuchtdichte 1 % der eingestellten Adaptationsleuchtdichte betrug, um einen störenden Einfluss auf die Adaptation zu verhindern [Nar 77]. Die Winkelgröße dieses Feldes entsprach $1,3^\circ$, angelehnt an die Hälfte einer Fahrstreifenbreite von 3,5 m [Nar 77].

Weil die Fixationszeit eines Beobachters mit 0,2 s für die Schwellenmessung in der Straßenbeleuchtung im Allgemeinen verwendet wird (Kapitel 3.1), wurde für die Versuchsreihen II und III diese Darbietungsdauer benutzt. Für die Versuchsreihe I wurde hingegen $t = 0,12$ s verwendet, um den Ur-Versuch von Narisada zu wiederholen [Nar 77]. Die ähnlichste Farbtemperatur von Testzeichen und Hintergrund war 4000 K, was mit dem Versuch von Narisada annähernd vergleichbar ist [Nar 77] (Kapitel 3.2).

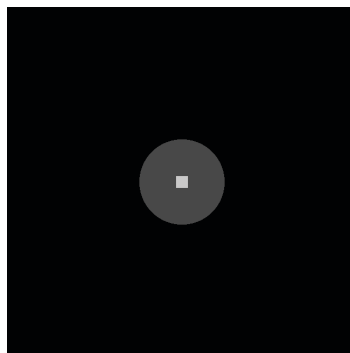


Abbildung 24: Ansicht des quadratischen Testzeichens mit kreisrundem Hintergrundfeld (Projektor 2)

Alle projizierten Adaptationsfelder/Schleierfelder waren kreisförmig und enthielten einen Fixationspunkt (Abbildung 25). Für den hier beschriebenen Versuchsaufbau wurden die folgenden relevanten Straßenleuchtdichten (als $L_{a,n,A}$ bzw. $L_{a,n,B}$) verwendet: $0,2 \text{ cd/m}^2$, 1 cd/m^2 , 5 cd/m^2 und 25 cd/m^2 , wobei insbesondere die obere und untere Grenze den Fall der nassen Fahrbahn erfassen.

Die Feldwinkelgröße des Kreisdurchmessers war entweder 3° (vergleichbar mit dem Versuch von Narsida [Nar 77]) oder 4° groß, je nachdem, ob das Testobjekt den Versuchspersonen foveal oder extrafoveal dargeboten wurde. Beide Winkelwerte lassen sich auf eine Fahrstreifenbreite von ca. 3,5 m bei einer Beobach-

tungsentfernung von etwa 70m zuordnen. Bei der Wahl des 4°-Feldes (mit $\beta = 1,8^\circ$) darf man annehmen, dass das Hindernis bereits auf dem gegenüberliegenden Fahrstreifen bzw. am rechten Fahrbahnrand detektiert wird (Anhang 8.1). Größere Felder wurden nicht verwendet, um eine praxisfremde/störende Schleierüberlagerung aus der dezentralen Umgebung zu vermeiden (Umgebungsschleier: Gleichung (11)). Die ähnlichste Farbtemperatur war wie beim Testzeichen 4000 K (vergleichbar mit Narisada's Versuch [Nar 77], Kapitel 3.2).

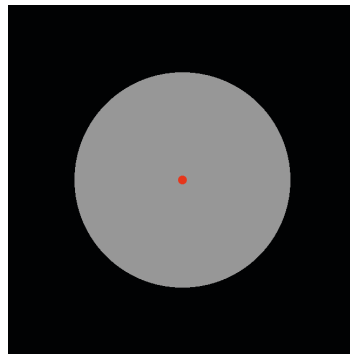


Abbildung 25: Ansicht des kreisrunden Adaptationsfeldes gleichzeitig fungierend als Schleierfeld mit Fixationspunkt (Projektor 1)

4.3 Versuchsdurchführung

Die Hauptuntersuchung zur Bestimmung der Werte für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit Blendungsschleier und ohne Blendungsschleier wurde in drei eigenständige Versuchsreihen aufgeteilt: Narisada-Replikation (Versuchsreihe I), Darbietungsdauer (Versuchsreihe II) und Darbietungsart (Versuchsreihe III).

Bei Voruntersuchungen ist die eigene Apparatur und Messmethode verfeinert worden, um einen schnellen und genauen Ablauf der Experimente zu ermöglichen. Beispielsweise wurde bei der Einmessung der verschiedenen Testbilder (Sehobjekt, Hintergrundfeld und Adaptationsfeld/Schleierfeld) mittels einer ortsauflösenden Leuchtdichtemesstechnik und Auswertungssoftware eine Korrektur der von den beiden Projektoren jeweils erzeugten Ungleichmäßigkeit durchgeführt (LMK 3, Firma TechnoTeam). Die Leuchtdichtegleichmäßigkeit (Verhältnis der minimalen zur maximalen Leuchtdichte) konnte dadurch verbessert werden: Die Leuchtdichteverteilung im kreisrunden Adaptations- bzw. Schleierfeld ist nahezu homogen (von 0,76 vor der Korrektur auf 0,92 nach der Korrektur).

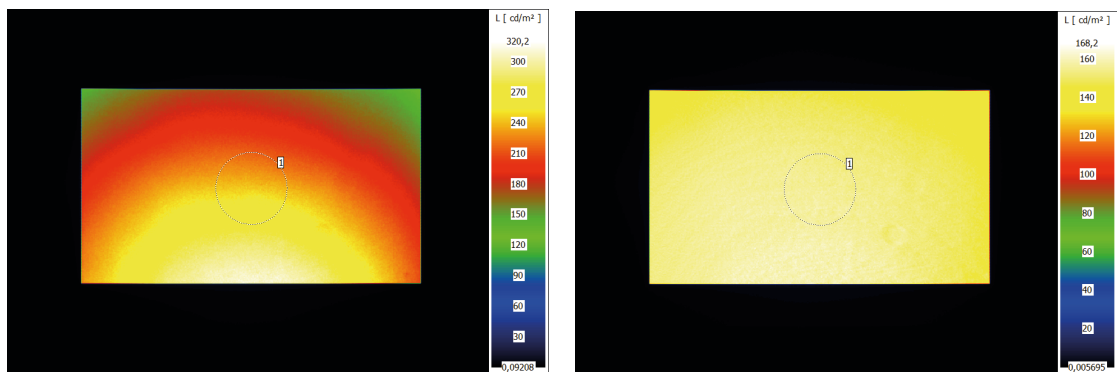


Abbildung 26: Ansicht der Leuchtdichteverteilung von Projektor 1 vor und nach der Korrektur der Gleichmäßigkeit im Adaptationsfeld/Schleierfeld (Kreisregion)

4.3.1 Testserien

Um den unterschiedlichen Einfluss des physiologischen und physikalischen Effekts der Schleierleuchtdichte auf den Gesamtwert für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Unterschiedsschwelle) zu bestimmen, wurden zwei Testserien entsprechend der Versuchsmethode nach Narisada entworfen (Kapitel 3.2) [Nar 77].

In einer ersten Testserie (Testserie-A) wurde das quadratische Sehobjekt mit kreisrundem Hintergrundfeld gegenüber einer größeren kreisrunden adaptationsbestimmenden Umgebung, die gleichzeitig als äquivalenter Blendungsschleier diente, dargeboten (Abbildung 27 und Abbildung 28). Bei dieser Testserie kann ein Wert für die Unterschiedsschwelle (Schwellenwert) gemessen werden, der mit dem physiologischen und physikalischen Gesamteffekt der Schleierleuchtdichte korrespondiert.

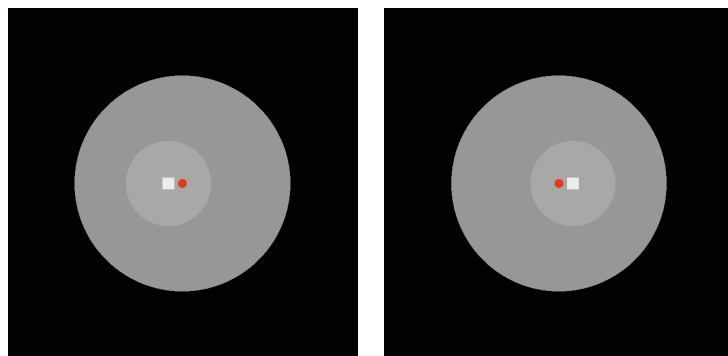


Abbildung 27: Optionen bei fovealer Beobachtung ($\beta = 0,2^\circ$) mit Adaptationsfeld/Schleierfeld im Blickfeld der Versuchsperson in Testserie-A. Links: foveale Darbietung des Sehobjektes links vom roten Fixationspunkt. Rechts: foveale Darbietung rechts vom Fixationspunkt

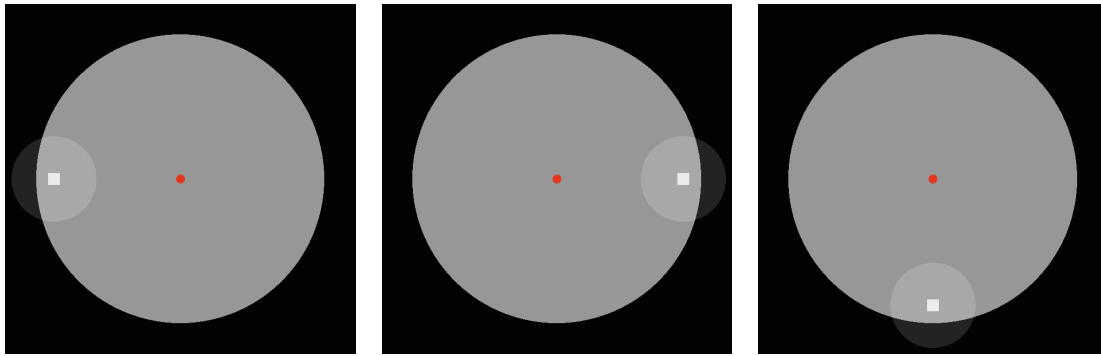


Abbildung 28: Optionen bei extrafovealer Beobachtung ($\beta = 1,8^\circ$) mit Adaptationsfeld/Schleierfeld im Blickfeld der Versuchsperson in Testserie-A. Links: extrafoveale Darbietung des Sehobjektes links vom roten Fixationspunkt. Mitte: extrafoveale Darbietung rechts vom roten Fixationspunkt. Rechts: extrafoveale Darbietung unten

In einer zweiten Testserie (Testserie-B), die im Wesentlichen identisch zu Testserie-A ist, wurde demgegenüber das Adaptationsfeld/Schleierfeld während der Darbietung des Testobjektes ausgeschaltet (Abbildung 29 und Abbildung 30). Diese Ausschaltphase dauerte etwa 1 s (jeweils 0,5 s vor und 0,5 s nach der Testzeichendarbietung) und ermöglicht eine Schwellenmessung ohne den physikalischen Effekt des Schleiers. Laut Narisada ist eine Änderung des Adaptationszustands aufgrund der kurzen Zeitspanne von 0,5 s zwischen der Leuchtdichteänderung und Testobjektdarbietung vernachlässigbar (Adaptationsfehler: Kapitel 4.5.4) [Nar 77]. Demnach konnte bei dieser Testserie der physiologische Effekt der Schleierleuchtdichte auf den Schwellenwert direkt gemessen werden.

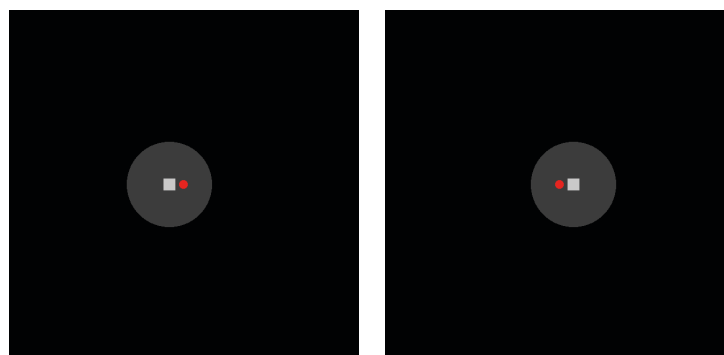


Abbildung 29: Optionen bei fovealer Beobachtung ($\beta = 0,2^\circ$) ohne Adaptationsfeld/Schleierfeld im Blickfeld der Versuchsperson in Testserie-B. Links: foveale Darbietung des Sehobjektes links vom roten Fixationspunkt. Rechts: foveale Darbietung rechts vom Fixationspunkt

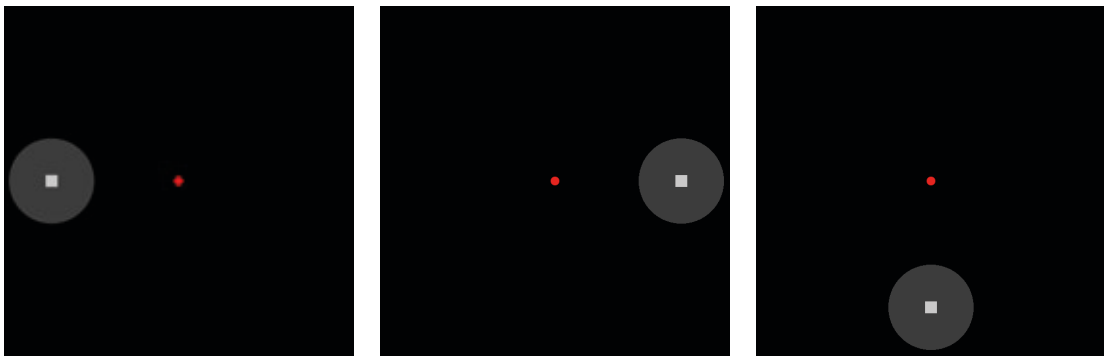


Abbildung 30: Optionen bei extrafovealer Beobachtung ($\beta = 1,8^\circ$) ohne Adaptationsfeld/Schleierfeld im Blickfeld der Versuchsperson in Testserie-B. Links: extrafoveale Darbietung des Sehobjektes links vom roten Fixationspunkt. Mitte: extrafoveale Darbietung rechts vom roten Fixationspunkt. Rechts: extrafoveale Darbietung unten

Das bedeutet, dass trotz derselben Adaptation unterschiedliche Werte für die Unterschiedsschwelle in der Testserie-A und Testserie-B gemessen werden. Nach Narisada's Versuchsmethode ergibt sich infolgedessen der gesuchte Schwellenwert für den physikalischen Effekt der Schleierleuchtdichte aus der Differenz zwischen dem Schwellenwert der Testserie-A und dem Schwellenwert der Testserie-B (Kurve C: Gleichung (14)) [Nar 95], was einer Differenzmessung gleichkommt.

4.3.2 Ablauf der Untersuchung

Zur Durchführung der Versuchsreihen ist die oben ausgeführte Versuchsanordnung verwendet worden. Für einen fehlervermindernden, stabilen Einsatz der beiden Projektoren wurden diese jeweils eine Stunde vor einem Versuchsbeginn aufgrund ihres langsamen Anlaufverhaltens eingeschaltet (Anhang 8.2).

Eine Versuchsperson hatte an mehreren Sitzungen mit einer jeweiligen Dauer von maximal 2 h teilzunehmen. Jede Sitzung bestand aus mehreren Versuchen, wobei die Leuchtdichte der einzelnen Versuche über die Sitzungsdauer stets erhöht wurde, um eine etwaige Ermüdung zu minimieren. Bei Beginn einer jeden Sitzung musste die Versuchsperson 15 min bei geschlossenen Augen im Versuchspersonenstand (Abbildung 17 und Abbildung 18 in Kapitel 4.2.1) dunkeladaptieren, um sich an die erforderliche Unterschiedsempfindlichkeit bezüglich der minimal verwendeten Leuchtdichtestufe von $0,2 \text{ cd/m}^2$ anzupassen [Eck 93].

Während dieser Dunkeladaptationsphase wurde vom Versuchsleiter eine geometrische und photometrische Kalibrierung der beiden Projektoren vorgenommen. Im

Anschluss daran wurden die Versuchsdateien (falls erforderlich) entsprechend korrigiert.

Jeder Versuch begann mit einer zweiminütigen Voradaptation an das ausgewählte Leuchtdichteniveau des Adaptationsfeldes/Schleierfeldes. Danach folgte die Schwellenmessung mit einer randomisierten Darbietung von 8 verschiedenen Leuchtdichtunterschieden (inklusive Catch Trials) für das Testobjekt. Insgesamt erfolgten 10 Darbietungen je Leuchtdichteunterschied.

Die Versuchsperson hatte 2 s Zeit, um mithilfe einer modifizierten Spielkonsole eine Taste zu drücken, und mit Ja oder Nein zu antworten (Anhang 8.3). In Abhängigkeit des relativen Darbietungsortes vom Fixationspunkt unterteilte sich bei fovealer Beobachtung die Ja-Antwort in ‚links‘ und ‚rechts‘. Wenn das Testobjekt extrafoveal dargeboten wurde, war ‚unten‘ als weitere Ja-Antwort möglich. Bei keiner oder ungewollter Fehlantwort wurde die nachgelieferte Antwort handschriftlich notiert und später vor der statistischen Auswertung nachgetragen.

Die wiederholte Darbietung des Testobjektes fand mit einem Intervall von durchschnittlich 3 s statt, wenn die Testserie-A untersucht wurde. Bei der Testserie-B, die zusätzlich Leuchtdichtesprünge durch das kurzzeitige Abschalten des Adaptations- bzw. Schleierfeldes enthielt, wurde die Darbietung auf eine Intervallzeit von 5 s vergrößert (Anhang 8.3), um Anpassungsprobleme nach einem Dunkeladaptations-Puls an die Ausgangsleuchtdichte zu vermeiden. Diese Intervallzeit scheint auch deshalb ausreichend groß für die schnelle Wiederherstellung des alten Adaptationszustandes zu sein, weil sich bei den vergleichbaren Versuchen von Greule zum Dunkeladaptations-Puls zeigte, dass der Schwellenerhöhungsfaktor (Φ) bereits 2 s nach der Leuchtdichteänderung einen Wert von nahezu 1 annimmt [Gre 93]. Zum Vergleich sei nochmals erwähnt, dass Narisada eine längere Intervallzeit von 10 s benutzte (Kapitel 3.2).

Je nach durchgeführter Testserie dauerte ein Durchlauf etwa 8 min bei fovealer und etwa 12 min bei extrafovealer Beobachtung. Nach erfolgreichem Versuchsende wurde das Messprotokoll mit den Messwerten in einer XML-Datei auf dem Steuer-Laptop gespeichert.

4.3.3 Versuchsreihen

Zur experimentellen Messung des Wertes für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Unterschiedsschwelle) mit und ohne Blendungsschleier sind insgesamt drei Versuchsreihen durchgeführt worden, die jeweils ein in sich geschlossenes System präsentierten.

In der *Versuchsreihe I* wurde die originale Messung von Narisada unter vergleichbaren Versuchsbedingungen mit einem größeren Versuchspersonenkollektiv wiederholt. Ziel war, seine Messergebnisse in einem eingeschränkten Leuchtdichtebe-
reich zu replizieren. Untersucht wurde hierbei die Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle ΔL_{\min} von der Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ (Testserie-A) bzw. L_f (Testserie-B), wobei angenommen wird, dass der Wert von $L_{s,l,k}$ identisch ist mit dem von L_f (Adaptationsfehler: Kapitel 4.5.4). Die Versuchsparameter mit den dazugehörigen geometrischen und fotometrischen Definitionen zeigt Tabelle 1, die in Kapitel 4.2.3 begründet sind.

Tabelle 1: Versuchsparameter der Versuchsreihe I

Parameter	Definition
Schleierleuchtdichte	1 cd/m ² , 5 cd/m ² , 25 cd/m ²
Hintergrundleuchtdichte	0,01 cd/m ² , 0,05 cd/m ² , 0,25 cd/m ²
Schleierfeldgröße	3°
Hintergrundfeldgröße	1,3°
Darbietungsdauer	0,12 s
Sehwinkelgröße	10'
Darbietungsart	foveal (links, rechts vom Fixationspunkt)

Die *Versuchsreihe II* ist vergleichbar mit der Versuchsreihe I. Jedoch wurde die Darbietungsdauer auf 0,2s vergrößert, um den Anschluss an die Standard-Darbietungsdauer herzustellen (Kapitel 3.1). Untersucht wurde wiederum die Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle ΔL_{\min} von der Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ (Testserie-A) bzw. L_f (Testserie-B). Tabelle 2 zeigt die Versuchsparameter und die dazugehörigen geometrischen bzw. fotometrischen Definitionen, die in Kapitel 4.2.3 begründet sind.

Tabelle 2: Versuchsparameter der Versuchsreihe II

Parameter	Definition
Schleierleuchtdichte	0,2 cd/m ² , 1 cd/m ² , 5 cd/m ² , 25 cd/m ²
Hintergrundleuchtdichte	0,002 cd/m ² , 0,01 cd/m ² , 0,05 cd/m ² , 0,25 cd/m ²
Schleierfeldgröße	3°
Hintergrundfeldgröße	1,3°
Darbietungsdauer	0,2 s
Sehwinkelgröße	10'
Darbietungsart	foveal (links, rechts vom Fixationspunkt)

Die *Versuchsreihe III* ist mit der Versuchsreihe II vergleichbar, außer das die Darbietungsart von foveal ($\beta = 0,2^\circ$) auf extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$) geändert wurde. Damit einhergehend wurde die Winkelgröße des Adaptationsfeldes/Schleierfeldes von 3° auf 4° angehoben. Untersucht wurde wiederum die Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle ΔL_{\min} von der Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ (Testserie-A) bzw. L_f (Testserie-B). Tabelle 3 zeigt die Versuchsparameter und die dazugehörigen geometrischen bzw. fotometrischen Definitionen, die in Kapitel 4.2.3 begründet sind.

Tabelle 3: Versuchsparameter der Versuchsreihe III

Parameter	Definition
Schleierleuchtdichte	0,2 cd/m ² , 1 cd/m ² , 5 cd/m ² , 25 cd/m ²
Hintergrundleuchtdichte	0,002 cd/m ² , 0,01 cd/m ² , 0,05 cd/m ² , 0,25 cd/m ²
Schleierfeldgröße	4°
Hintergrundfeldgröße	1,3°
Darbietungsdauer	0,2 s
Sehwinkelgröße	10'
Darbietungsart	extrafoveal (links, rechts, unten vom Fixationspunkt)

4.4 Versuchspersonen

Die Versuchsreihen wurden von insgesamt 32 voll sehtüchtigen Versuchspersonen im Alter von 20 bis 38 Jahren durchgeführt, deren Zusammensetzung bezüglich Alter und Geschlecht aus Abbildung 31 hervorgeht. Falls Brillen oder Kontaktlinsen verordnet sind, hatte die Versuchsperson diese während der Messreihen entsprechend zu tragen.

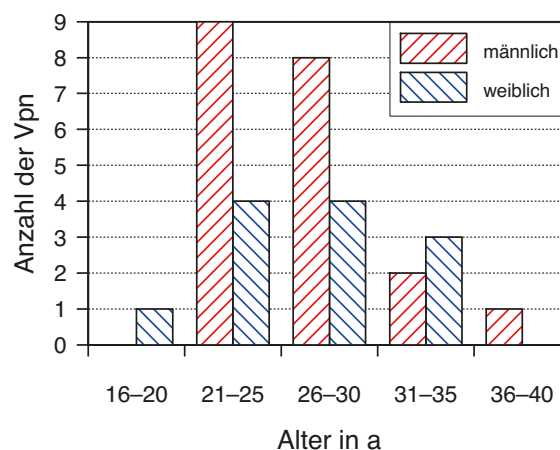


Abbildung 31: Alters- und Geschlechterverteilung der Versuchspersonen (Vpn), Durchschnittsalter des Beobachterkollektives: (27 ± 4) a

Jede Versuchsperson ist vor Beginn der Hauptuntersuchung auf ihre Eignung getestet worden. Ausgewählt wurden die sehtüchtigen Versuchspersonen nach den folgenden wesentlichen Kriterien: a) Normalsichtigkeit mit einem Visus von $\geq 0,8$, b) normale Kontrastempfindlichkeit, c) keine Nachtmyopie und d) keine erhöhte Blendempfindlichkeit. Für den Eignungstest wurden die folgenden Messgeräte zur Prüfung des Sehvermögens verwendet: Sehtestgerät R22 (Firma Rodenstock, Testparameter: Visus), VCTS-Sehtafel (Visual Contrast Test System, Firma Vistech Consultants, Testparameter: Kontrastempfindlichkeit) und Mesotest II (Firma Oculus, Testparameter: Nachtmyopie, Blendempfindlichkeit).

4.5 Fehlerdiskussion und statistische Auswertung

Im Folgenden werden zunächst relevante Fehlereinflüsse exemplarisch aufgezeigt, die durch die Versuchsmethodik bedingt sind. Anschließend erfolgt die Darstellung der verwendeten statistischen Größen und Prüfverfahren, bevor in Kapitel 5 die Ergebnisse zur Schwellenmessung mit und ohne Blendungsschleier dargestellt werden.

4.5.1 Apparaturfehler

Zur Abschätzung des relativen Maximalgesamtfehlers der Apparatur im Sinne einer Eigenabweichung vom Zielwert des eingestellten Leuchtdichteunterschiedes (z) ist eine Fehlerberechnung erforderlich. Denn dieser Wert setzt sich aus mehre-

ren Eingangsgrößen bzw. Einstellwerten zusammen, die alle mit einem gewissen Fehler behaftet sind. Als mathematischer Zusammenhang soll Gleichung (8) mit $k_w = 1$ und $AF = 1$ dienen, wobei der Sehwinkel des Objektes α , die Darbietungsdauer t und die Adaptationsleuchtdichte L_a die Einstellwerte sind. Damit ergibt sich für $z = \Delta L_{\min} = f(\alpha, t, L_a)$.

Die Fehler der Einstellgrößen sind abschätzbar. Als Ablesefehler für die Einstellung der Objektgröße mithilfe einer Millimeterskala eines Lineals wird die Hälfte des Abstandes der Teilungsstriche (0,5 mm) angesetzt. Der Fehler für die Darbietungsdauer wird mit einer Zeit eines zehntel Frames (4 ms) abgeschätzt. Als relativer Fehler für die Adaptationsleuchtdichte wird insgesamt 5,8 % angenommen (d. h. 3 % für die Messgenauigkeit der Leuchtdichtemesskamera; 0,7 % für die Zeitinstabilität des Projektors; 2,1 % Unsicherheit für die Kalibrierung des Projektors jeweils vor und nach einer Versuchsreihe).

Unter der Voraussetzung, dass die Einstellwerte voneinander unabhängig sind, gilt das Fehlerfortpflanzungsgesetz für Maximalfehler:

$$\Delta z = \left| \frac{\partial f(\alpha, t, L_a)}{\partial \alpha} \right| \Delta \alpha + \left| \frac{\partial f(\alpha, t, L_a)}{\partial t} \right| \Delta t + \left| \frac{\partial f(\alpha, t, L_a)}{\partial L_a} \right| \Delta L_a \quad (16)$$

mit

$$\begin{aligned}
\Delta z = & \left| \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(R \cdot \left(\frac{\sqrt{\phi(L_a)}}{\alpha} + \sqrt{L(L_a)} \right)^2 \cdot \frac{a(\alpha, L_a) + t}{t} \cdot F_{CP}(\alpha, L_a) \right) \right| \Delta \alpha \\
& + \left| \frac{\partial}{\partial t} \left(R \cdot \left(\frac{\sqrt{\phi(L_a)}}{\alpha} + \sqrt{L(L_a)} \right)^2 \cdot \frac{a(\alpha, L_a) + t}{t} \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot F_{CP}(\alpha, L_a) \right) \right| \Delta t \\
& + \left| \frac{\partial}{\partial L_a} \left(R \cdot \left(\frac{\sqrt{\phi(L_a)}}{\alpha} + \sqrt{L(L_a)} \right)^2 \cdot \frac{a(\alpha, L_a) + t}{t} \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot F_{CP}(\alpha, L_a) \right) \right| \Delta L_a.
\end{aligned}$$

Darin bedeuten:

Δz	resultierende absolute Maximalgesamtfehler der Ausgangsgröße Leuchtdichteunterschiedsschwelle;
$\Delta \alpha$	Maximalfehler der Eingangsgröße Sehwinkel des Objektes;
Δt	Maximalfehler der Eingangsgröße Darbietungsdauer;
ΔL_a	Maximalfehler der Eingangsgröße Adaptationsleuchtdichte.

Die Formel für den relativen Maximalgesamtfehler erhält man dadurch, dass die Gleichung (16) auf beiden Seiten durch z geteilt wird. Die Summanden und Gesamtfehler in Abhängigkeit der in den Versuchsreihen I, II und III verwendeten Darbietungsdauern und Adaptationsleuchtdichten enthalten Tabelle 4 bis Tabelle 6.

Tabelle 4: Fehler-Tabelle zur Bestimmung des resultierenden relativen Maximalfehlers in Versuchsreihe I bei der fovealen Schwellenmessung. Eingangsgrößen: $\alpha = 10'$, $t = 0,12\text{ s}$, $L_a = 1, 5$ oder 25 cd/m^2 , $R = 1$

L_a in cd/m^2	1.0	5.0	25.0
R	1.00	1.00	1.00
$\Delta\alpha$ in $'$	0.3942	0.3942	0.3942
Δt in s	0.0040	0.0040	0.0040
ΔL_a in cd/m^2	0.0580	0.2900	1.4500
$\delta f/\delta\alpha$	0.0049	0.0125	0.0398
$\delta f/\delta t$	0.1692	0.4780	1.6351
$\delta f/\delta L_a$	0.0244	0.0171	0.0138
$\delta f/\delta\alpha*\Delta\alpha$	0.0019	0.0049	0.0157
$\delta f/\delta t*\Delta t$	0.0007	0.0019	0.0065
$\delta f/\delta L_a*\Delta L_a$	0.0014	0.0050	0.0200
z in cd/m^2	0.0399	0.1220	0.4431
Δz in cd/m^2	0.0040	0.0118	0.0423
$\Delta z/z*100$ in %	10.1	9.7	9.5

Tabelle 5: Fehler-Tabelle zur Bestimmung des resultierenden relativen Maximalfehlers in Versuchsreihe II bei der fovealen Schwellenmessung. Eingangsgrößen: $\alpha = 10'$, $t = 0,2\text{ s}$, $L_a = 0,2, 1, 5$ oder 25 cd/m^2 , $R = 1$

L_a in cd/m^2	0.20	1.0	5.0	25.0
R	1.00	1.00	1.00	1.00
$\Delta\alpha$ in $'$	0.3942	0.3942	0.3942	0.3942
Δt in s	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040
ΔL_a in cd/m^2	0.0116	0.0580	0.2900	1.4500
$\delta f/\delta\alpha$	0.0017	0.0039	0.0098	0.0312
$\delta f/\delta t$	0.0266	0.0609	0.1721	0.5886
$\delta f/\delta L_a$	0.0319	0.0197	0.0138	0.0112
$\delta f/\delta\alpha*\Delta\alpha$	0.0007	0.0015	0.0039	0.0123
$\delta f/\delta t*\Delta t$	0.0001	0.0002	0.0007	0.0024
$\delta f/\delta L_a*\Delta L_a$	0.0004	0.0011	0.0040	0.0163
z in cd/m^2	0.0131	0.0302	0.0923	0.3528
Δz in cd/m^2	0.0012	0.0029	0.0086	0.0310
$\Delta z/z*100$ in %	8.8	9.6	9.3	8.8

Tabelle 6: Fehler-Tabelle zur Bestimmung des resultierenden relativen Maximalfehlers in Versuchsreihe III bei der extrafovealen Schwellenmessung. Eingangsgrößen: $\alpha = 10'$, $t = 0,2$ s, $L_a = 0,2, 1, 5$ oder 25 cd/m^2 , $R = 1,65, 1,8, 2, 2,17$ (nach Gleichung (15) in Kapitel 3.3)

L_a in cd/m^2	0.20	1.0	5.0	25.0
R	1.65	1.80	2.00	2.17
$\Delta\alpha$ in $'$	0.3942	0.3942	0.3942	0.3942
Δt in s	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040
ΔL_a in cd/m^2	0.0116	0.0580	0.2900	1.4500
$\delta f / \delta \alpha$	0.003	0.007	0.020	0.068
$\delta f / \delta t$	0.044	0.110	0.344	1.280
$\delta f / \delta L_a$	0.053	0.035	0.028	0.024
$\delta f / \delta \alpha * \Delta \alpha$	0.0011	0.0027	0.0077	0.0268
$\delta f / \delta t * \Delta t$	0.0002	0.0004	0.0014	0.0051
$\delta f / \delta L_a * \Delta L_a$	0.0006	0.0021	0.0080	0.0355
z in cd/m^2	0.0217	0.0544	0.1842	0.7671
Δz in cd/m^2	0.0019	0.0052	0.0171	0.0674
$\Delta z / z * 100$ in %	8.8	9.6	9.3	8.8

Demnach beträgt der relative Apparaturfehler maximal 10,1 % (Versuchsreihe I, $L_a = 1 \text{ cd/m}^2$), 9,6 % (Versuchsreihe II, $L_a = 1 \text{ cd/m}^2$) und 9,6 % (Versuchsreihe III, $L_a = 1 \text{ cd/m}^2$), wobei mit zunehmendem Leuchtdichteniveau der Fehler abnimmt. Der Umstand, dass der Fehler bei $L_a = 0,2 \text{ cd/m}^2$ zunächst kleiner ausfällt als bei größeren Werten für L_a , zeigt den unterschiedliche Abhängigkeit der Funktionen $\sqrt{\Phi_r(L_a)}$ und $\sqrt{L_w(L_a)}$ von L_a in Gleichung (8). Man sieht zudem, dass in den Versuchsreihen II und III die beiden Eingangsgrößen Objektgröße und Adaptationsleuchtdichte mit zunehmendem Leuchtdichteniveau eine um mehr als den Faktor 3 höhere Ungenauigkeit besitzen als die Eingangsgröße Darbietungsdauer. Deshalb sollte bei einer möglichen Wiederholung des Experiments an dieser Stelle als erstes eine höhere Genauigkeit angestrebt werden.

Es bleibt zu erwähnen, dass für die Differentialrechnung bei Gleichung (16) das Computerprogramm Maple (Version 17, 2013) verwendet wurde.

4.5.2 Streuung der Versuchspersonen

Zur Abschätzung einer Streuung der Versuchspersonen, welche als intra- und interindividuelle Streuung auftritt und die Versuchsergebnisse beeinflusst, ist eine Prüfung erforderlich. Die intraindividuelle Streuung bezieht sich auf die Streuung der Messergebnisse einer Versuchsperson, wobei diese einen gleichen Versuch mehrfach wiederholt. Die größere interindividuelle Streuung berücksichtigt die Messergebnisse von verschiedenen Versuchspersonen, die einen gleichen Versuch absolvieren [Gre 93].

Um die Streuung der Messergebnisse zu beschreiben, wird als robustes Streuungsmaß der Variationskoeffizient verwendet. Diese statistische Kenngröße ist definiert als die Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert der Messwerte in % [Bor 93].

Die Streuung der Versuchsperson(en) kann aufgrund von Ermüdung auftreten, wodurch Messwerte auswandern bzw. streuen. Die Dauer einer Sitzung betrug jeweils 2 h, was einen Ermüdungseffekt erwarten lässt, weil laut Erfahrung eine Messdauer von 1 h nicht überschritten werden sollte. Die intraindividuelle und interindividuelle Streuung wurde mit 7 Versuchspersonen ermittelt, indem vier Wiederholungsmessungen innerhalb von 2 h durchgeführt worden. Für die einzelne Versuchsperson ergibt sich eine geringe Streuung von rund 6–14 %. Für alle Versuchspersonen wird eine Streuung von rund 8–25 % ermittelt. Abbildung 32 zeigt exemplarisch die Streuungen der einzelnen Versuchspersonen bezogen auf den durchschnittlichen Wert für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Schwellenwert) aller Versuchspersonen. Beim statistischen Vergleich der Mittelwerte der vier abhängigen Stichproben, der mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt wurde (Tabelle 7 in Kapitel 4.5.5), ergibt sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0,185$ (Versuchsreihe II, Testserie-A) und $p = 0,294$ (Versuchsreihe II, Testserie-B), was keinen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Zeitpunkten für die untersuchte Versuchspersonengruppe bedeutet.

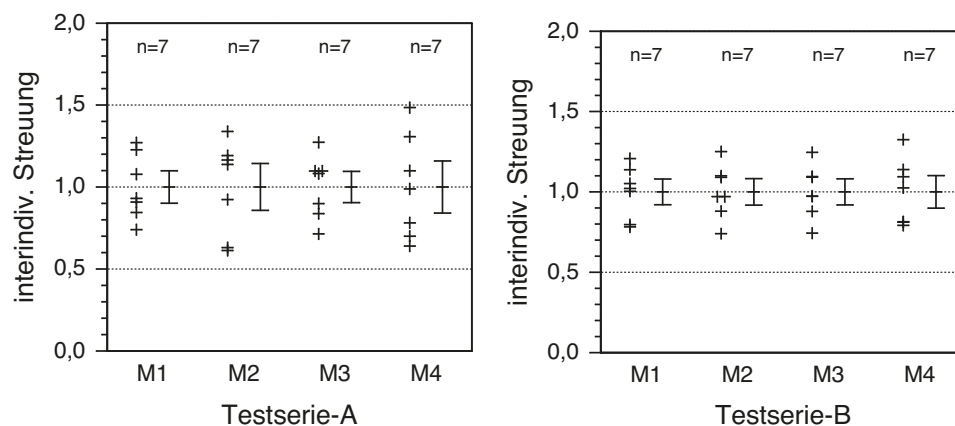


Abbildung 32: Interindividuelle Streuung hinsichtlich des mittleren Schwellenwertes. Messzeitpunkte M1 bis M4. Parameter: foveal, $\alpha = 10'$, $t = 0,2 \text{ s}$, $L_{a,n,A}(\text{Testserie-A}) = L_{a,n,B}(\text{Testserie-B}) = 5 \text{ cd/m}^2$

Die Streuung der Versuchsperson(en) kann auch aufgrund von zeitlichen Schwankungen über einen größeren Zeitraum auftreten, wodurch Messwerte streuen. Über den gesamten Zeitraum des Experiments von drei Monaten (August–Oktober) wurde an 5 Versuchspersonen die Streuung mittels monatlicher Wiederholungsmessungen exemplarisch ermittelt. Für die einzelne Versuchsperson ergibt sich eine geringe Streuung von rund 7–18 % (Versuchsreihe II) und 11–16 % (Versuchsreihe III). Für alle Versuchspersonen wird eine interindividuelle Streuung von rund 16–21 % (Versuchsreihe II) und 14–20 % (Versuchsreihe III) ermittelt. Beim statistischen Vergleich der Mittelwerte der drei abhängigen Stichproben, der mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt wurde (Tabelle 7 in Kapitel 4.5.5), ergibt sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0,990$ (Versuchsreihe II, Testserie-A) und $p = 0,594$ (Versuchsreihe II, Testserie-B), was keinen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen (im Abstand von einem Monat gelegenen) Zeitpunkten für die untersuchte Versuchspersonengruppe bedeutet.

Betrachtet man die größere Abweichung bei der interindividuellen Streuung, so liegt das an Unterschieden in den Bereichen der Motivation, Übung und Physiologie [Gre 93]. Eine Ursache für die physiologischen-optischen Unterschiede ist das unterschiedliche Alter der Versuchspersonen. Dieser Alterseinfluss spielt beim ausgewählten Beobachterkollektiv jedoch eine untergeordnete Rolle, weil die geringe Streuung von 4 Jahren beim jungen Durchschnittsalter von 27 Jahren den

Altersfaktor AF von ca. 1 kaum verändert (Kapitel 3.1 und Abbildung 31 in Kapitel 4.4).

Abschließend bleibt somit positiv festzustellen, dass die Streuung der Messergebnisse der Versuchsreihen mehr von personenbedingten Fehlern als von der Unsicherheit der Apparatur geprägt ist.

4.5.3 Feldgrößenfehler

Es soll des Weiteren geprüft werden, ob sich als eine weitere Fehlerquelle der Wert für die foveale Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Schwellenwert) bei der Verwendung eines 3°-Adaptationsfeldes im Vergleich zum 4° großen Feld verändert. Dazu wurde die foveale Antwort von 11 Versuchspersonen untersucht. Beim statistischen Vergleich der Mittelwerte der zwei verbundenen Stichproben, der mithilfe eines t-Tests für abhängige Stichproben durchgeführt wurde (Tabelle 7 in Kapitel 4.5.5), ergibt sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0,340$ ($t = 0,2$ s, Testserie-A) und $p = 0,759$ ($t = 0,2$ s, Testserie-B), was keine signifikante Änderung des Schwellenwertes vom 3°-Feld zum 4°-Feld für die untersuchte Versuchspersonengruppe bedeutet. Der Einfluss der Größe des Adaptationsfeldes/Schleierfeldes im Bereich zwischen 3° und 4° auf den Schwellenwert ist daher für diese Gruppe vernachlässigbar. Für die nachfolgende Diskussion und Weiterentwicklung der TI -Formel ist deshalb festzuhalten, dass ein Vergleich zwischen den fovealen (3°-Feld) und extrafovealen (4°-Feld) Schwellenwerten nicht unzulässig scheint (z. B. Abbildung 45 und Abbildung 46 in Kapitel 5.3).

4.5.4 Adaptationsfehler

Zur groben Abschätzung des Fehlereinflusses allein durch eine transiente Adaptationserscheinung innerhalb der Testserie-B (Kapitel 4.3.1) im Sinne einer Abweichung vom Adaptationszustand vor einer Leuchtdichteänderung ist die Berechnung einer Empfindlichkeitsänderung förderlich. Diese Änderung lässt sich mit dem Schwellenerhöhungsfaktor (Φ) bestimmen [Gre 93] [CIE 81]:

$$\Phi = \frac{1}{TAF_1} = \frac{\Delta L_{\min, \tau}}{\Delta L_{\min, \tau_0}}. \quad (17)$$

Darin bedeuten:

Φ	Schwellenerhöhungsfaktor;
TAF_1	Glance Transient Adaptation Factor;
ΔL_{\min}	Leuchtdichteunterschiedsschwelle in cd/m^2 ;
τ	Zeitspanne zwischen einer Leuchtdichteänderung und der Darbietung eines Testsehobjektes;
τ_0	Zeitpunkt an dem die transiente Adaptation beendet ist.

Der TAF_1 -Faktor wird für Leuchtdichtepulse (im Gegensatz zum TAF_2 , dem Readaptation Transient Adaptation Factor für Leuchtdichtesprünge [CIE 81]) angewendet. Abbildung 33 zeigt die beiden Leuchtdichteänderungen, die mit den Faktoren TAF_1 und TAF_2 berechnet werden können.

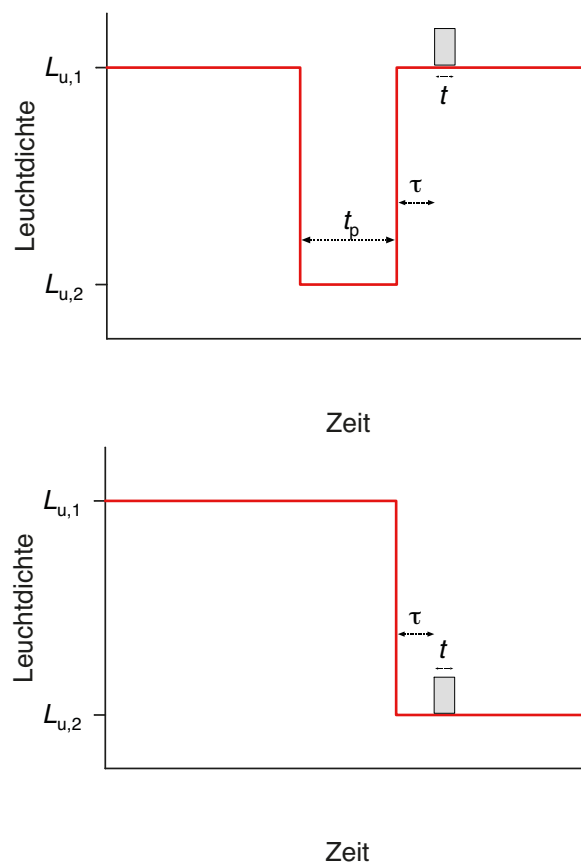


Abbildung 33: Verlauf der Leuchtdichteänderung und der Testobjektdarbietung bei einem Leuchtdichtepuls als Abwärtspuls (links) und einem Leuchtdichtesprung als Abwärtssprung (rechts) für die Anwendung von TAF_1 (links) und TAF_2 (rechts) mit $\tau = 0,3 \text{ s}$

Der Leuchtdichtepuls in der Testserie-B entspricht einem Dunkeladaptationspuls mit einer Dauer von 1 s (Kapitel 4.3.1). Der TAF_1 -Faktor beschreibt die Empfindlichkeitsänderung zum Zeitpunkt $\tau = 0,3$ s für eine Pulsdauer ≤ 2 s sowie für eine Darbietungsdauer des Sehobjektes $t = 0,2$ s und errechnet sich folgendermaßen [CIE 81]:

$$TAF_1 = 1 - 0,136 \cdot \left(\log \frac{L_{u,1} \cdot RCS(L_{u,2})}{L_{u,2} \cdot RCS(L_{u,1})} - 0,182 \right) \quad (18)$$

mit

$$RCS = 1,555 \cdot \left(\left(\frac{1,639}{L_u} \right)^{0,4} + 1 \right)^{-2,5}.$$

Darin bedeuten u. a.:

- $L_{u,1}$ Umgebungsleuchtdichte vor dem Dunkeladaptationspuls;
- $L_{u,2}$ Umgebungsleuchtdichte während des Dunkeladaptationspulses;
- RCS relative Kontrastempfindlichkeit.

Abbildung 34 zeigt den Einfluss des Abwärtspulses auf die berechneten Schwellenerhöhungsfaktoren auf Basis des TAF_1 -Faktors bis zu einem realisierten Leuchtdichteverhältnis von 200:1. Aus den Kurven lässt sich ableiten, dass der Adaptationsfehler mit steigender Umgebungsleuchtdichte und größer werdendem Leuchtdichteverhältnis zunimmt. Demnach kommt der Fehlereinfluss des Dunkeladaptationspulses mit etwa 2 % bis 15 % im untersuchten Leuchtdichtebereich erwartungsgemäß kaum zum Tragen.

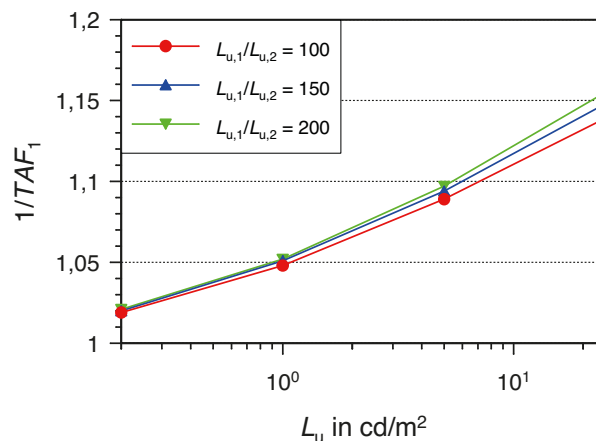


Abbildung 34: Kurvenverlauf des Schwellenerhöhungsfaktors Φ in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte L_u . Parameter: Leuchtdichteverhältnis $L_{u,1}/L_{u,2}$

Diese Abschätzung kann aber nur eine grobe sein, weil die Zuordnung des Schwellenerhöhungsfaktors nur zum Zeitpunkt $\tau = 0,3 \text{ s}$ möglich ist, obgleich der in der Testserie-B abzuschätzende Schwellenerhöhungsfaktor dem Zeitpunkt $\tau = -0,5 \text{ s}$ zugeordnet ist. Deshalb und aufgrund der langsam verlaufenden Dunkeladaptation bei Abwärtspulsen ist der tatsächliche Fehlereinfluss kleiner als der hier abgeschätzte. Insofern kann der Aussage von Narisada zugestimmt werden, dass die Änderung des Adaptationszustandes aufgrund der kürzeren Zeitspanne von $0,5 \text{ s}$ zwischen der Leuchtdichteänderung und der Testzeichendarbietung vernachlässigbar ist [Nar 77]. So kann die Gleichheit der wirksamen Leuchtdichten näherungsweise angenommen werden: $L_{a,n,A} = L_{a,n,B}$ bzw. $L_{s,l,k} = L_f$ (Kapitel 4.3.1 und Kapitel 4.3.3).

4.5.5 Statistische Auswertung

Um eine Beziehung zwischen dargebotener Reizintensität und gemessener Antwort aufzustellen und um daraus schließlich den Wert für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Unterschiedsschwelle) zu bestimmen, wird eine Regressionsanalyse auf die Messkurven der Versuchsreihen I, II und III angewendet. Zur Lösung des nichtlinearen Ausgleichsproblems wurde der Levenberg-Marquardt-Algorithmus mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Als s-förmige Modellfunktion diente die Verteilungsfunktion der Normalverteilung [Ueb 15].

Eine etwaige Antworttendenz der Versuchsperson (d. h. falscher Alarm während der Catch Trials) wird berücksichtigt, indem eine Korrektur des Wertes für die Unterschiedsschwelle (Schwellenwert) verwendet wird (siehe Abbildung 35). Die Korrektur wurde mithilfe der Formel von Abbot berechnet [Sch 15b], indem zunächst die von der Messfunktion ermittelte Detektionsrate für den falschen Alarm von 1 subtrahiert wird. Die Multiplikation von 0,5 und diesem Ergebnis plus der Detektionsrate für den falschen Alarm ergibt den korrigierten Wert.

Am Beginn stand eine Datenaufbereitung. Fehlerbehaftete Rohmessdaten wurden anhand von Korrekturdaten berichtigt. Danach erfolgte eine automatisierte Übertragung der Messdaten (mit Hilfe von VBA 7.0) von den Messdateien nach Excel [Ueb 14], was zu einer verbesserten Interpretierbarkeit und Lesbarkeit für die weitere Modellanpassung führte. Diese wurde zur Ermittlung der Antwortkurve (mit

Tabelle 7: Zu untersuchende Testfälle mit den entsprechenden statistischen Tests auf Basis der individuellen Daten der einzelnen Versuchspersonen

Testfall	Testsituationen	statistischer Test
Personenfehler: 2-h-Ermüdung	Vergleich von mehr als zwei abhängigen Stichproben	einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung
Personenfehler: 3-m-Zeitraum	Vergleich von mehr als zwei abhängigen Stichproben	einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung
Feldgrößenfehler: 3°-Feld vs. 4°-Feld	Vergleich von zwei abhängigen Stichproben	t-Test für abhängige Stichproben
Exzentrizität bei Testserie-B: foveale Antwort vs. extrafoveale Antwort	Vergleich von zwei unabhängigen Stichproben	t-Test für unabhängige Stichproben

Als Voraussetzung für die Durchführung der Vergleiche der Stichproben ist geprüft worden, ob deren Mittelwerte aus normalverteilten Werten entspringen. Die Überprüfung der Verteilungsform erfolgte zum einen optisch mit Hilfe von grafischer Darstellung in Form eines Normalverteilungsdiagramms (Abbildung 36), zum anderen objektiv mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests bzw. Shapiro-Wilk-Tests. Diese Tests prüfen, ob die Messwerte der Normalverteilung folgen. Wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit (p) kleiner als 0,05 ist, dann weicht die geprüfte Verteilung signifikant von der Normalverteilung ab. Unter den gegebenen Verhältnissen erzielt der Datensatz mit den bereinigten Messwerten meistens $p \geq 0,1$ (Anhang 8.4). Damit ist eine Abweichung von der Normalverteilung nahezu nicht nachweisbar.

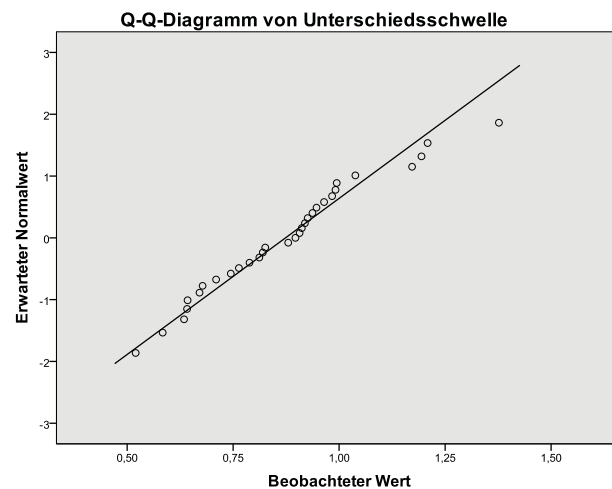


Abbildung 36: Beispielhafte Punkteverteilung im Normalverteilungsdiagramm (auch Q-Q-Diagramm genannt) einer Versuchspersonengruppe. Im Normalverteilungsfall liegen die Punkte auf der Geraden. Im Beispiel ist die Abweichung von der Geraden hinreichend gering. Als Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Tests erhält man $p = 0,2$. Damit kann eine Normalverteilung angenommen werden

Erwähnt sei noch die Software, die für die statistische Auswertung verwendet wurde: IBM SPSS Statistics 20 (Superior Performing Software System). Das SPSS-Programm ist ein Statistikprogramm, das eine Vielzahl von Auswertungen für die empirische Praxis ermöglicht.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Versuchsreihe I: Narisada-Replikation

In dieser Versuchsreihe geht es um die Replikation unter gleichen Versuchsbedingungen des Ur-Versuchs von Narisada (Kapitel 3.2), um seine Reproduzierbarkeit nachzuweisen. Ausgehend von seinen Bedingungen sollen vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. In diesem Fall gälte sein Ergebnis als replizierbar und verlässlich.

Abbildung 37 zeigt die Abhängigkeit des Wertes für die mittleren Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Unterschiedsschwelle) von der Leuchtdichte für die Testserie-A und Testserie-B basierend auf den Messkurven gemäß Anhang 8.5. Wie bereits festgestellt, ergeben sich systematische Unterschiede zwischen den beiden Serien. Der Vergleich des Kurvenverlaufs lässt diesbezüglich erkennen, dass erwartungsgemäß die obere Kurve (Testserie-A) deutlich höher und steiler verläuft als die untere Kurve (Testserie-B). Aus diesem Ergebnis kann man folgern, dass die wahrgenommene Kontrastminderung des äquivalenten Blendungsschleiers bei Testserie-A einen deutlichen Einfluss auf die Steigung der Schwellenkurve nimmt und somit nicht zu vernachlässigen ist.

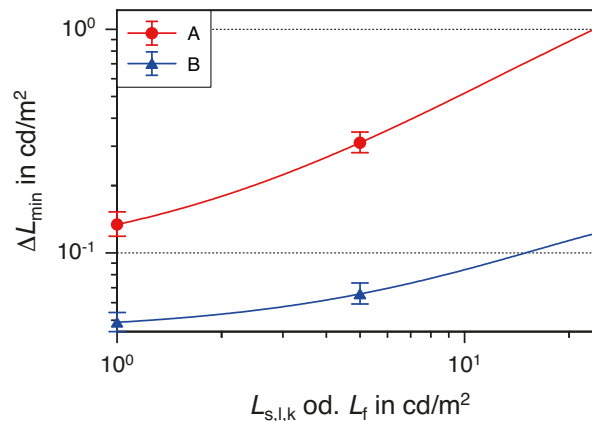


Abbildung 37: Verlauf der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) bei der Testserie-A (Kurve A) in Abhängigkeit der Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ und bei der Testserie-B (Kurve B) in Abhängigkeit der Leuchtdichte L_f . Parameter: foveal, $t = 0,12$ s

Abbildung 38 veranschaulicht den direkten Vergleich der ermittelten Werte für die Unterschiedsschwelle (Schwellenwerte) nach Narisada mit dem Ergebnis aus der eigenen Versuchsreihe. Wie man erkennen kann, liegt eine recht gute Übereinstimmung vor. Der Schwellenwert der einzigen Versuchsperson von Narisada be-

findet sich jeweils innerhalb der Punktwolke der individuellen Schwellenwerte der einzelnen Versuchspersonen. Die durchgehende Verschiebung nach unten könnte durch folgende Abweichungen verursacht worden sein: 1) vergleichsweise höhere Schwellensehleistung der japanischen Versuchsperson aufgrund einer längeren Dunkeladaptationsdauer von 30 min oder aufgrund der längeren Intervallzeit von 10 s, 2) vergleichsweise größerer Sehwinkel des Objektes als $10'$, 3) vergleichsweise längere Darbietungsdauer als 0,12 s, etc.

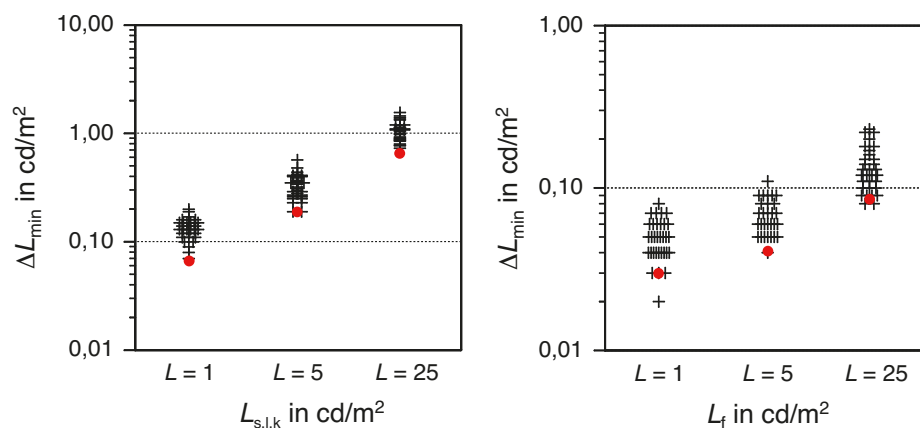


Abbildung 38: Vergleich der Einzelschwellenwertverteilung der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (linkes Diagramm) und Testserie-B (rechtes Diagramm) mit den Messergebnissen von Narisada (roter Punkt). Parameter: foveal, $t = 0,12$ s

Es kann daher festgestellt werden, dass vergleichbare Messergebnisse mit einem größeren Versuchspersonenkollektiv unabhängig erzielt wurden. Das von Narisada gefundene experimentelle Ergebnis kann bekräftigt werden und demzufolge als replizierbar und verlässlich gelten.

Zusätzlich sollen die eigenen Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen für den Schwellenwert nach Adrian verglichen werden (Gleichung (8) in Kapitel 3.1). Im Gegensatz zum eigenem Versuch basieren die Ergebnisse nach Adrian auf Schwellenuntersuchungen ohne Blendungsschleier. Abbildung 39 zeigt den Vergleich der Schwellenwerte. Aus den Kurven lässt sich erkennen, dass der fehlende Einfluss der Kontrastminderung infolge Blendung zu deutlich kleineren Schwellenwerten bei Adrian führt. Aus diesem Ergebnis kann man ebenso folgern, dass der Einfluss des Blendungsschleiers auf die Unterschiedsschwelle nicht zu vernachlässigen ist (siehe dazu auch Kapitel 5.2).

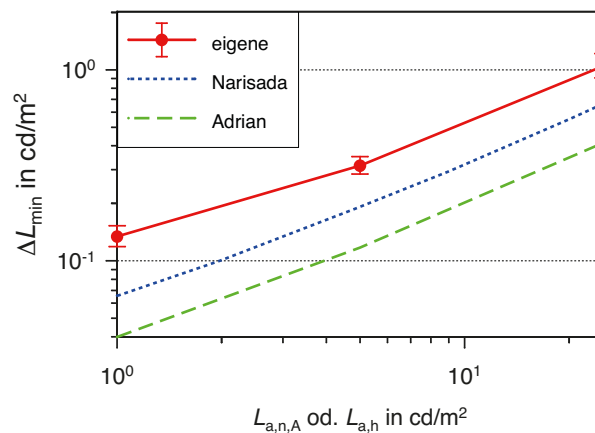


Abbildung 39: Vergleich der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (als Funktion von $L_{a,n,A}$) mit dem Messwertergebnis von Narisada (als Funktion von $L_{a,n,A}$) sowie mit dem Berechnungsergebnis nach Adrian (als Funktion von $L_{a,h}$). Parameter: foveal, $t = 0,12$ s, Alter = 27 a

5.2 Versuchsreihe II: Foveale Antwort

In dieser Versuchsreihe geht es um die Frage, welcher Wert für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Schwellenwert) sich einstellt, wenn die Darbietungsdauer nicht $t = 0,12$ s sondern $t = 0,2$ s beträgt. Der Grund für die Anhebung liegt einerseits darin, dass die Darbietungsdauer $t = 0,2$ s von großer Bedeutung in der Straßenbeleuchtung ist, weil sie im Allgemeinen für die typische Fixationszeit angesehen wird (Kapitel 3.1). Andererseits sind die Messergebnisse vom Schwellenversuch mit äquivalentem Blendungsschleier nicht auf die Ergebnisse von Schwellenversuchen ohne Blendungsschleier sowie deren Berechnungsergebnisse übertragbar.

Abbildung 40 stellt die Versuchsergebnisse der ermittelten mittleren Schwellenwerte in Abhängigkeit der Leuchtdichte dar, bei der Testserie-A und Testserie-B basierend auf den Messkurven im Anhang 8.6. Wie bereits bei der Versuchsreihe I festgestellt, verlaufen auch hier die Schwellenwerte von Testserie-A höher und steiler als diejenigen, die in Testserie-B gemessen worden sind.

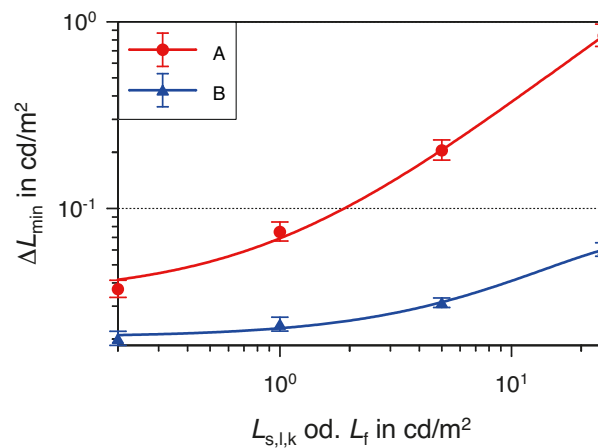


Abbildung 40: Verlauf der mittleren Schwellenwerte ΔL_{min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) bei der Testserie-A (Kurve A mit Regressionsgleichung: $y = 0,0346 + 0,0347x - 9,5257 \cdot 10^{-5}x^2$ mit $R^2 = 0,99$) in Abhängigkeit von $L_{s,l,k}$ und bei der Testserie-B (Kurve B mit Regressionsgleichung: $y = 0,0205 + 0,0023x - 3,051 \cdot 10^{-5}x^2$ mit $R^2 = 0,99$) in Abhängigkeit von L_f . Parameter: foveal, $t = 0,2$ s

Wiederum sollen die eigenen Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen nach Adrian/Blackwell verglichen werden. Dabei basieren diese Berechnungsergebnisse auf identischen Eingangsgrößen: Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 50 %, Sehwinkelgröße = 10', Darbietungsdauer = 0,2 s, Alter = 27 a. Auffallend in Abbildung 41 sind erneut die relativ größeren Schwellenwerte aufgrund des zusätzlich erfassten physikalischen Effektes des Blendungsschleiers (Kontrastminderung) als bei den Schwellenwerten ohne diesen Effekt, wobei der Abstand zwischen den beiden Schwellenkurven annähernd konstant ist (Faktor 2,5). Der Abstand würde aber noch deutlicher ausfallen, wenn die Blackwell-Daten den Fehlereinfluss des Umgebungsschleiers nicht beinhalten würden, welcher den Schwellenwert zusätzlich ansteigen lässt (siehe Gleichung (10) in Kapitel 3.1).

Es scheint also, dass der kontrastmindernde Effekt des Schleiers mit zunehmender Schleierleuchtdichte schneller anwächst als sein gleichzeitig auftretender Netzhautaufhellungseffekt und daher einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Schwellenwerterhöhung bei Blendung nimmt. Diese Eigenschaft ist beim Vergleich der Kurvenverläufe der Kurven B und C noch deutlicher erkennbar (siehe Abbildung 50). Hiermit zeigt sich wiederholt, dass die Schwellenwerte nach Blackwell/Adrian nicht allein für eine korrekte *TI*-Modellierung ausreichen, weil diese Werte lediglich den schwächeren Netzhautaufhellungseffekt erfassen.

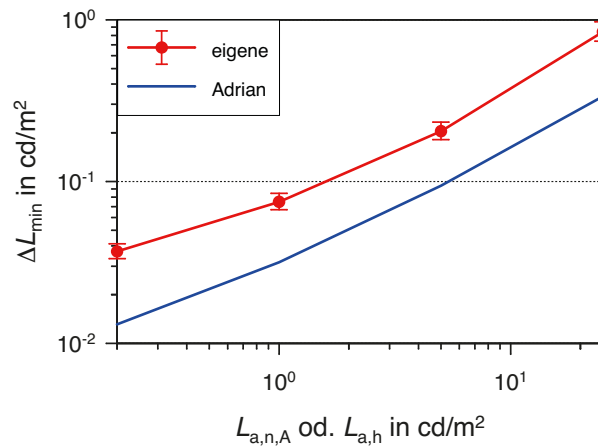


Abbildung 41: Vergleich der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (als Funktion von $L_{a,n,A}$) mit dem Berechnungsergebnis nach Adrian (als Funktion von $L_{a,h}$). Parameter: foveal, $t = 0,2$ s, Alter = 27 a

Weiterhin ist zu erwähnen, dass sich der gemessene Schwellenwert wie erwartet verkleinert, wenn die Darbietungsdauer von 0,12 s auf 0,2 s zunimmt (siehe Abbildung 42). Der genauere Vergleich mit berechneten Schwellendaten nach Adrian verdeutlicht außerdem, dass der eigene Zeitfaktor bei kleinen Leuchtdichten für die Testserie-A größer ausfällt und sich mit zunehmendem Adaptationsniveau dem Faktor von Adrian annähert (siehe Abbildung 43). Die Testserie-B lässt hingegen erkennen, dass der eigene Zeitfaktor nahezu unabhängig vom Adaptationsniveau ist und deutlich größer ausfällt als der Faktor nach Adrian. Beide Trends deuten an, dass der berechnete Zeitfaktor nach Adrian für die eigenen Schwellendaten nicht direkt anwendbar ist.

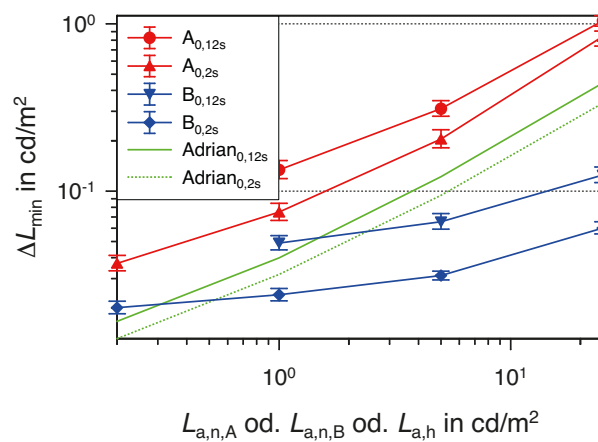


Abbildung 42: Vergleich der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (Kurve A, als Funktion von $L_{a,n,A}$) und Testserie-B (Kurve B, als Funktion von $L_{a,n,B}$) mit dem Berechnungsergebnis nach Adrian (als Funktion von $L_{a,h}$). Parameter: foveal, $t = 0,12$ s (gestrichelte Kurve), $t = 0,2$ s (voll ausgezogene Kurve), Alter = 27 a

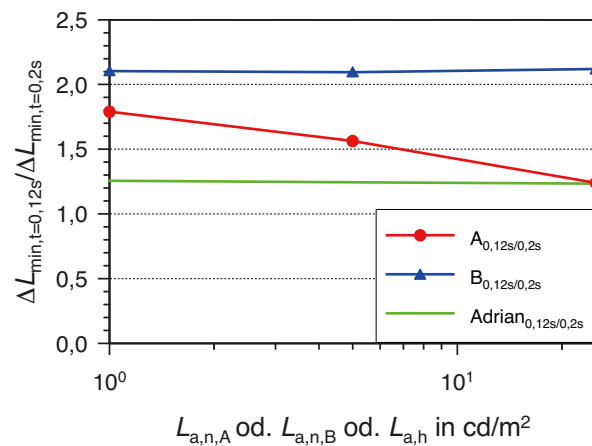


Abbildung 43: Vergleich der Zeitfaktoren der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (Kurve A) bzw. Testserie-B (Kurve B) in Abhängigkeit von $L_{a,n,A}$ bzw. $L_{a,n,B}$ mit dem Berechnungsergebnis nach Adrian in Abhängigkeit von $L_{a,h}$. Ermittelte Zeitfaktoren bei Kurve A (von ca. 1,8 auf 1,2), bei Kurve B (ca. 2,1) und bei Kurve Adrian (ca. 1,2). Parameter: foveal, Alter = 27 a

5.3 Versuchsreihe III: Extrafoveale Antwort

In dieser Versuchsreihe geht es um die Frage, welche Erhöhung des Wertes für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Schwellenwert) sich einstellt, wenn die Darbietungsart nicht foveal sondern extrafoveal ist. Der Grund für den Wechsel liegt einerseits darin, dass die Schwellendaten zur Ableitung der gegenwärtigen *TI*-Formel auf nicht ausschließlich extrafovealer (d. h. fovealer und extrafovealer) Wahrnehmung beruhen. Rein periphere Hindernisse im Straßenraum sind schwerer detektierbar und sollten genauso detektierbar sein, was zu einer höheren Sehsicherheit seitens der Beleuchtung führen und eine verbesserte Entblendung der Leuchten erforderlich machen würde (Kapitel 3.3).

Abbildung 44 zeigt die Versuchsergebnisse der ermittelten Schwellenwerte in Abhängigkeit der Leuchtdichte hinsichtlich der Testserie-A und Testserie-B basierend auf den Messkurven im Anhang 8.7. Wie bereits bei den Versuchsreihen I und II festgestellt, verlaufen die Schwellenwerte von Testserie-A höher und steiler als diejenigen von Testserie-B.

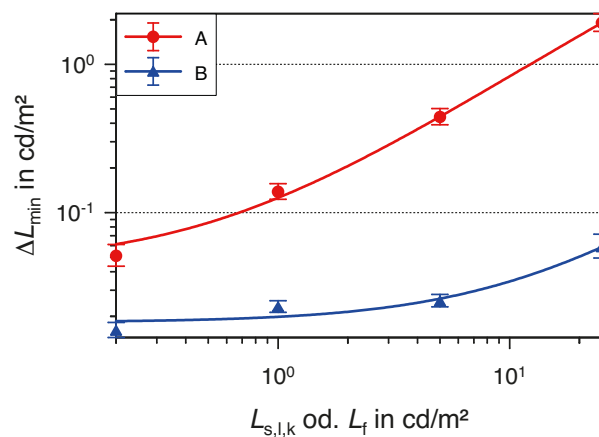


Abbildung 44: Verlauf der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) bei der Testserie-A (Kurve A mit Regressionsgleichung: $y = 0,0451 + 0,081x - 0,0003x^2$ mit $R^2 = 0,99$) in Abhängigkeit der Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ und bei der Testserie-B (Kurve B mit Regressionsgleichung: $y = 0,0184 + 0,0015x + 4,2747 \cdot 10^{-6}x^2$ mit $R^2 = 0,98$) in Abhängigkeit der Leuchtdichte L_f . Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), $t = 0,2\text{ s}$

Zudem sollen die Messergebnisse mit den eigenen Ergebnissen der fovealen Beobachtung direkt verglichen werden. Die Auswirkungen einer Veränderung der Darbietungsart zeigen die Abbildung 45 und Abbildung 46, wiederum für die untersuchten Adaptationsleuchtdichten dargestellt. Die Schwellenwerte bei Testserie-A sind erwartungsgemäß bei extrafovealer Beobachtung größer als bei fovealer. Die Ursache für diese Schwellenerhöhung ist darin zu sehen, dass die Sehaufgabe bei extrafovealem Objekt schwieriger ist.

Die Ähnlichkeit der Schwellenkurvenverläufe bei der Testserie-B ist bemerkenswert, die nicht erwartungsgemäß nahezu unabhängig von der Darbietungsart dicht nebeneinander liegen. Beim statistischen Vergleich der Mittelwerte der unabhängigen Stichproben, der mithilfe eines t-Tests für unabhängige Stichproben durchgeführt wurde (Tabelle 7 in Kapitel 4.5.5), ergeben sich Irrtumswahrscheinlichkeiten von $p = 0,018$ ($L_f = 0,2\text{ cd/m}^2$), $p = 0,574$ ($L_f = 1,0\text{ cd/m}^2$), $p = 0,013$ ($L_f = 5,0\text{ cd/m}^2$) und $p = 0,083$ ($L_f = 25\text{ cd/m}^2$), was keinen signifikanten Unterschied zwischen zwei von vier Leuchtdichtestufen der fovealen und extrafovealen Schwellenmessung ($\beta = 1,8^\circ$) für die untersuchte Versuchspersonengruppe bedeutet. Der Einfluss der Darbietungsart auf den Schwellenwert bei der Testserie-B ist daher nicht nachweisbar.

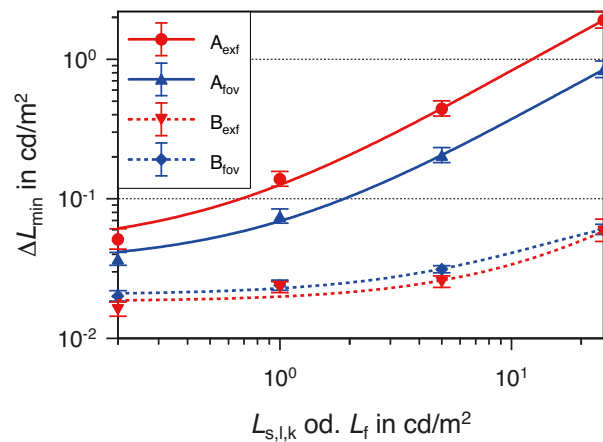


Abbildung 45: Vergleich der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) der extrafovealen Ergebnisse für die Testserie-A (voll ausgezogene Kurve A, als Funktion von $L_{s,l,k}$) und Testserie-B (gestrichelte Kurve B, als Funktion von L_f) mit den fovealen Ergebnissen. Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), foveal, $t = 0,2$ s

Die kleinen relativen Schwankungen im Mittel von 11 % zwischen den Schwellenwerten der fovealen und extrafovealen Detektion in der Testserie-B sind im Vergleich mit den Abweichungen von durchschnittlich 91 % bei den Schwellenwerten in der Testserie-A wenig bedeutsam. Demnach können aus Sicht der *TI*-Modellierung die Unterschiedsschwellen für beide Schwellenmessungen der Testserie-B zusammengefasst und als geschlossene Messung behandelt werden. In der vorliegenden Arbeit wird daher die foveale Schwellenkurve der Testserie-B auch auf die extrafoveale Näherungsgleichung angewendet.

Ferner sollen die eigenen Messergebnisse mit den Untersuchungsergebnissen nach Adrian verglichen werden, um den Einflussfaktor der Exzentrizität bzgl. Blickrichtung auf den Praxisfaktor abzuschätzen. Zu diesem Zweck wurde für die untersuchte Exzentrizität von $\beta = 1,8^\circ$ das *R*-Verhältnis (zwischen dem fovealen und extrafovealen Schwellenwert) in Abhängigkeit der Leuchtdichte für die Testserie-A berechnet (Abbildung 13 in Kapitel 3.3). Abbildung 46 zeigt, dass die Schwellenerhöhung von der Adaptationsleuchtdichte abhängt, und dass die eigene Schwellenerhöhung nur geringfügig von Adrian's Schwellenerhöhung abweicht. Wie man sieht, liegt der eigene Faktor zwischen ca. 1,4 und 2,3 und fällt etwas größer aus als bei den Werten von Adrian. Der Grund hierfür mag darin liegen, dass die Blackwell-Daten nicht ausschließlich eine extrafoveale Beobachtung sondern auch eine foveale beinhalten. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass Adrian die Blackwell-Daten als rein foveale Schwellendaten fälschlicherweise einstuft.

Der Vergleich mit den Abschätzungen von Narisada und Hentschel (Kapitel 3.3) zeigt, dass die eigenen Werte kleiner ausfallen. Man darf annehmen, dass der unmittelbare Einfluss der Unerwartetheit bei Narisada im Felde und ansatzweise bei Hentschel im Labor die Schwellenerhöhung weiter vergrößert.

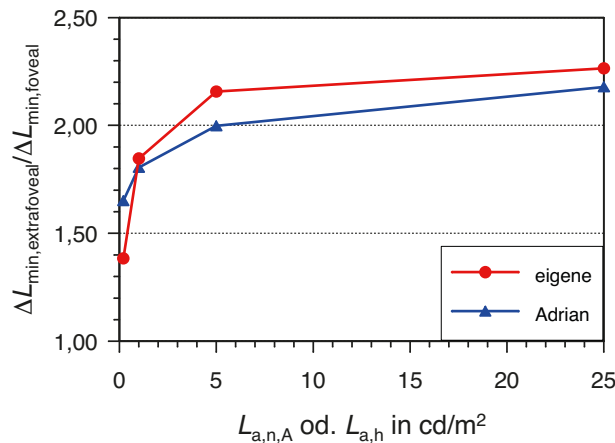


Abbildung 46: Vergleich des R -Verhältnisses der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (Kurve A) mit den Berechnungsergebnissen nach Adrian in Abhängigkeit der Leuchtdichten $L_{a,n,A}$ (Kurve A) bzw. $L_{a,h}$ (Kurve Adrian). Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$)/foveal, Alter = 27 a

5.4 Zusammenfassung

Ausgehend von den zu untersuchenden Hypothesen lassen sich die in den vorigen Abschnitten dargestellten Kurvenverläufe der Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Unterschiedsschwelle) als Ergebnis wie folgt zusammenfassen:

- Die Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle vom physikalischen Effekt der Schleierleuchtdichte (Kontrastminderung) macht deutlich, dass mit der blendungsschleierbasierten Schwellenmessmethode nach Narisada ein realistischeres Modell zur Bewertung der physiologischen Blendung vorliegt. Im Vergleich zum nicht blendungsschleierbasierten Schwellenmodell nach Adrian ist die relative Zuwachsrate des eigenen Schwellenwertes deutlich größer und daher nicht vernachlässigbar.
- Der Einfluss der Darbietungsdauer auf die Unterschiedsschwelle nach Narisada lässt erkennen, dass kein Zusammenhang zum Schwellenmodell von Adrian besteht. Im untersuchten Leuchtdichtebereich erreicht der Zeitfaktor eigene Werte bis über 2, während die Berechnung nach Adrian zu kleineren Werten

um 1,2 führt. Somit ist das Adrian-Modell nicht geeignet, den Einfluss der Darbietungsdauer bei den eigenen und Narisada-Schwellendaten vorherzusagen.

- Die eigene Schwellenmessung nach Narisada bei extrafovealer Beobachtung zeigt eine Besonderheit, weil sie nur teilweise eine Schwellenerhöhung im Vergleich zur fovealen Beobachtung ergibt. Während die bei Testserie-A gemessenen Schwellenwerte wie erwartet eine von der Leuchtdichte abhängige Schwellenerhöhung vom Wechsel von foveale auf extrafoveale Detektion ergeben (und einem Einflussfaktor auf den Praxisfaktor von etwa 2 entsprechen), ist diese Erhöhung bei den bei Testserie-B gemessenen Schwellenwerten nicht nachweisbar.
- Der unterschiedliche Verlauf der Schwellenkurven A und B verdeutlicht die Eignung der eigenen Messdaten für eine korrektere Bewertung der physiologischen Blendung. Diese Basisdaten sind deshalb für die Überarbeitung der *TI*-Formel (7) besser geeignet, weil die vollständige Wirkung des Blendungsschleiers (d. h. der physikalische und physiologische Effekt der äquivalenten Schleierleuchtdichte) erfassbar wird.

6 Überarbeitung der TI -Blendungsformel

6.1 Vorbemerkungen

Die TI -Blendungsformel stellt eine Näherungsformel für eine einfache Berechnung des Blendungsmaßes der Gleichung (6) dar, um dem Anwender komplizierte Rechenoperationen zu ersparen [Eic 70]. Dabei wird toleriert, dass nur genäherte Lösungen (und keine exakten) möglich sind. Die zugrunde liegende Näherungsmethode muss eine Abschätzung des Approximationsfehlers gestatten, der bei Anwendung der Näherungsformel auftritt.

Zur Entwicklung der eigenen Näherungsformeln wird hier als Näherungsmethode die diskrete Approximation im Mittel mit dazugehöriger Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Ausgangspunkt sind Mess- oder Rechenwerte der Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle), durch die eine ausgleichende Funktion gesetzt werden soll, so dass ihr Abstand zu den Mess- bzw. Rechenwerten insgesamt minimal wird.

Die Vorgehensweise der Näherungsmethode basiert auf einem nichtlinearen Ansatz, der auf einen linearen Fall zurückgeführt wird [Neu 00] [Neu 03] [Neu 14]. Für die Ansatzfunktion $y = \varphi(x)$ als Hyperebene wird eine geeignete nichtlineare Form der Potenzfunktion gewählt:

$$\begin{aligned} y = \varphi(x) &= \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &= ax_1^b \cdot x_2^c \cdot \dots \cdot x_n^z, \end{aligned} \quad (19)$$

mit

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Mittels einer logarithmischen Koordinatentransformation wird die Approximationsaufgabe in einen linearen Fall überführt:

$$X = X(x, y), \quad Y = Y(x, y), \quad (20)$$

$$Y = \Psi(X) = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_n X_n, \quad (21)$$

$$\ln y = \ln a + b \ln x_1 + c \ln x_2 + \dots + z \ln x_n.$$

Als Approximationsbedingung wird das zu minimierende Funktional für den Fall der Hyperebene definiert:

$$F = F(A_0, A_1, \dots, A_n) = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^N (Y_j - \Psi(X_j))^2 \rightarrow \min_A \quad (22)$$

wobei $N \gg 1$ die Menge der gegebenen Messdaten beschreibt. Der Polynomausgleich liefert die Koeffizienten A_0, A_1, \dots, A_n der approximierenden Funktion $\varphi(x)$, indem ein lineares Gleichungssystem (LGS) gelöst wird, sodass der Wert F minimal ist.

Als abschließender Schritt wird eine Rücktransformation durchgeführt, wobei die Parameter a, b, c, d, \dots in $\varphi(x)$ aus den Größen A_i berechnet werden:

$$a = e^{A_0}, b = e^{A_1}, \dots, z = e^{A_n}. \quad (23)$$

Die Präzision der Approximation ist durch den relativen Approximationsfehler gemessen. Unter der Voraussetzung, dass das LGS durch die Koeffizienten A_i erfüllt wird, gilt als relative Fehlerformel gemäß Gleichung (22):

$$\varepsilon = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \Psi(X_j))^2}{\sum_{j=1}^N Y_j^2}} = 100 \cdot \frac{\|Y - \Psi(X)\|^2}{\|Y\|^2}. \quad (24)$$

6.2 Modellierung nach Eichhoff (ohne Kontrastminderung)

Zur Überprüfung der von Eichhoff angegebenen *TI*-Formel (7) wird eine eigene analytische Funktion entwickelt. Ausgehend von Eichhoff's verwendeten Beziehungen zur Berechnung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle) nach Adrian [Eic 70], die sich auf die Messergebnisse von Blackwell stützen [Adr 69a], soll zunächst die äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,\text{äq}}$ in Abhängigkeit der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m für verschiedene prozentuale Schwellenwerterhöhungen *TI* aufgestellt werden.

In Abbildung 47 ist eine prinzipielle Vorgehensweise für eine Ermittlung des gesuchten Funktionszusammenhangs $L_{s,\text{äq}} = f(TI, L_m)$ dargestellt. In dieser wird von einer Leuchtdichte L_m ausgegangen (Punkt A). Über die Kurve erhält man eine Un-

terschiedsschwelle ohne Blendung (Punkt B). Setzt man in das Blendungsmaß eine prozentuale Schwellenwerterhöhung TI ein, so ergibt sich die Unterschiedsschwelle mit Blendung (Punkt C). Von diesem Punkt aus erhält man über die Kurve bzw. Umkehrfunktion einen Wert für $L_m + L_{s,\ddot{a}q}$ (Punkt D). Die Differenz aus beiden Werten der Punkte D und A ergibt eine dazugehörige äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q}$. Das Vorgehen wiederholt sich nun für beliebige Leuchtdichten und Schwellenwerterhöhungen.

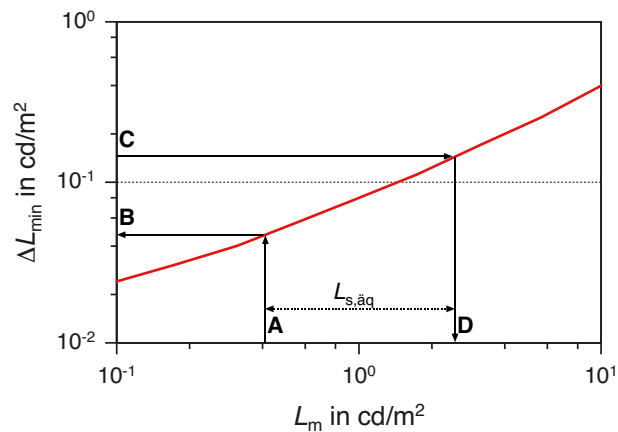


Abbildung 47: Prinzipieller Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m

In der Abbildung 48 ist der berechnete Funktionszusammenhang $L_{s,\ddot{a}q} = f(TI, L_m)$ anschaulich dargestellt. Man kann ablesen, dass die im logarithmischen Maßstab eingetragenen Punkte ab Leuchtdichten von etwa größer als 5 cd/m^2 den Anstieg leicht vergrößern. Aus Sicht einer fehlerminimierten Näherungsrechnung spricht das für eine Bereichsteilung, die Eichhoff insofern vornahm, als dass er eine Näherungsformel sowohl für niedrige (siehe Gleichung (7)) als auch höhere Fahrbahnleuchtdichten entwickelte.

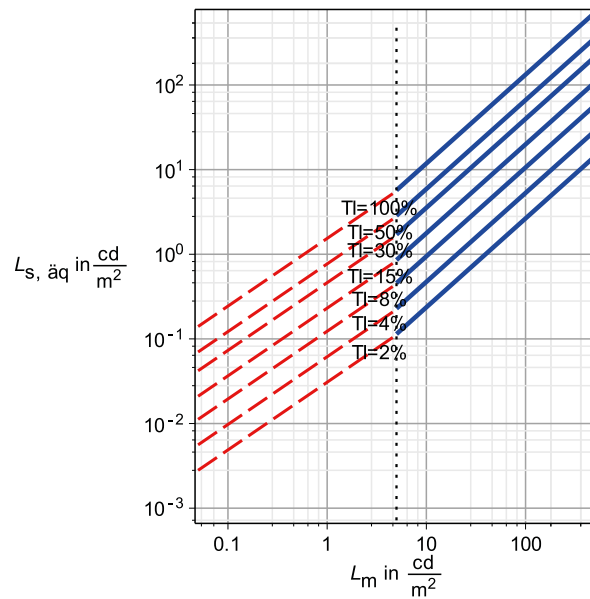


Abbildung 48: Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s, äq}$ in Abhängigkeit von der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m für konstante prozentuale Schwellenwerterhöhungen TI (nach Eichhoff [Eic 70])

Zur Überprüfung der herkömmlichen TI -Gleichung (7) wird für die Lösung der Approximationsaufgabe als Ansatzfunktion $y = \varphi(x)$ die folgende Potenzfunktion gewählt, um die Originaldaten am besten anzunähern:

$$y = \varphi(x) = \varphi(x_1, x_2) = ax_1^b \cdot x_2^c, \quad (25)$$

$$y = \varphi(x) = L_{s, äq}(TI, L_m) = a \cdot TI^b \cdot L_m^c.$$

Die Rücktransformation der Schwellendaten nach Adrian [Adr 69a] [Adr 89] gemäß Gleichung (23) führt zu folgenden Werten bezüglich der Parameter a , b und c aus Gleichung (25): $a = 0,0160$, $b = 1$ (per Definition) und $c = 0,7995$. Der Approximationsfehler ε gemäß Gleichung (24) liegt hier bei 1,4 %. Im Vergleich zu Eichhoff's Näherungsrechnung ist das eine höhere Genauigkeit, weil die nach seiner Näherungsformel berechneten Werte für TI einen relativen Fehler zwischen 5 % und 10 % ergaben. Für denselben Gültigkeitsbereich der Fahrbahnleuchtdichten ($0,05 \text{ cd/m}^2$ bis 5 cd/m^2 , trockene Fahrbahn) ergibt sich die folgende approximierte Beziehung:

$$TI = TI_{\text{foveal/extrafoveal, dry, } t=15s} = 62 \cdot \frac{L_{s, äq}}{L_m^{0,80}} \%. \quad (26)$$

Abbildung 49 enthält die gemeinsame Darstellung der Werte für die äquivalente Schleierleuchtdichte auf Basis der Näherungsfunktionen nach Gleichungen (7) und (26) als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte mit dem TI -Wert als Parameter. Der Vergleich macht deutlich, dass sich die von Eichhoff ermittelten Näherungswerte von den eigenen Werten kaum unterscheiden und folglich die gegenwärtige TI -Formel damit mathematisch erstmals als bestätigt gelten kann [Wal 14a] [Wal 15]. Im interessierenden Bereich der Fahrbahnleuchtdichten tritt eine konstante Abweichung von etwa 4 % auf.

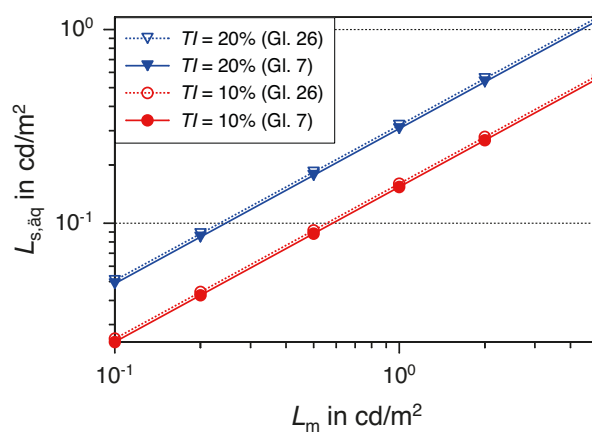


Abbildung 49: Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,äq}$ in Abhängigkeit der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m zur Erläuterung der Gültigkeit der gegenwärtigen TI -Formel. Die Kurven entsprechen den Näherungsgleichungen (7) und (26)

6.3 Eigene Modellierung (mit Kontrastminderung)

Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, basiert die herkömmliche TI -Gleichung (7) zur Bewertung der physiologischen Blendung nach Eichhoff auf früheren Schwellendaten (Gleichung (8) in Kapitel 3.1), die ohne Blendungsschleier (und daher ohne der inhärent wahrgenommenen Kontrastminderung infolge Blendung) erhoben wurden. Um den Blendungsverhältnissen in der Praxis näherzukommen, sollten für die Modellierung aber Schwellendaten einbezogen werden, die auf der stärker wahrgenommenen Kontrastminderung beruhen (Abbildung 40 in Kapitel 5.2 und Abbildung 44 in Kapitel 5.3).

Die TI -Gleichung (7) geht weiterhin vereinfachend von einer homogenen Leuchtdichteverteilung im Bewertungsfeld aus, indem sie die mittlere Fahrbahnleuchtdichte als alleinige adaptionsbestimmende Leuchtdichte des Beobachters (exklusive

Blendlicht) verwendet. Das soll deshalb nach Eichhoff zutreffend sein, weil in einem Bereich von etwa 3° Durchmesser in Blickrichtung „keine sehr großen Leuchtdichteschwankungen vorhanden sind“ [Eic 70]. Das trifft jedoch für die normgerechte ortsfeste Straßenbeleuchtung nur selten zu, weil die Leuchtdichten innerhalb des DIN-Bewertungsfeldes [DIN 04] zu ungleich sind (trockene Fahrbahn $L_{\min}:L_{\max} \leq 1:5$, nasse Fahrbahn $L_{\min}:L_{\max} \leq 1:100$) (siehe auch [Kha 09]). Um den Verhältnissen der Straßenbeleuchtung bei trockener und insbesondere bei nasser Fahrbahn näherzukommen, sollte deshalb die inhomogene Leuchtdichteverteilung im Bewertungsfeld einberechnet werden.

Zur Lösung dieser bislang ungelösten Aufgabe stützt sich der Autor auf die eigenen Messwerte für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit Blendungsschleier zur Berechnung der Gesamtunterschiedsschwelle, welche von der Summierbarkeit der Teilunterschiedsschwellen bezüglich der mittleren Fahrbahnleuchtdichte, der äquivalenten Schleierleuchtdichte und der Hintergrundleuchtdichte ausgeht (Abbildung 40 in Kapitel 5.2 und Abbildung 44 in Kapitel 5.3) [Nar 95] [Nar 03] [Nar 07]. Die Hintergrundleuchtdichte ist dabei die Einzelleuchtdichte auf der Fahrbahn in der jeweiligen Blickrichtung. Es soll zunächst die äquivalente Schleierleuchtdichte in Abhängigkeit der Hintergrundleuchtdichte und Fahrbahnleuchtdichte für verschiedene prozentuale Schwellenwerterhöhungen aufgestellt werden.

Ein Vorgehen zur Ermittlung des erweiterten Funktionszusammenhanges $L_{s,\text{äq}} = f(TI, L_m, L_h)$ wird in Abbildung 50 gezeigt. In dieser wird von einer Leuchtdichte L_m ausgegangen (Punkt A). Über die betreffende Kurve erhält man eine Teilunterschiedsschwelle bzgl. L_m (Punkt B). Des Weiteren geht man von einer Leuchtdichte L_h aus (Punkt C), wobei $L_{s,\text{äq}} = 0 \text{ cd/m}^2$ gesetzt wird. Über die betreffende Kurve erhält man eine Teilunterschiedsschwelle bzgl. L_h ohne Blendung (Punkt D). Die Summe der beiden Teilunterschiedsschwellen entspricht einer Gesamtunterschiedsschwelle ohne Blendung. Setzt man nun in das Blendungsmaß eine prozentuale Schwellenwerterhöhung TI ein, so ergibt sich die resultierende Gesamtunterschiedsschwelle mit Blendung. Bereinigt bzw. vermindert man diesen Gesamtschwellenwert um den Betrag der Teilunterschiedsschwelle bezüglich L_m , ergibt sich der Arbeitspunkt E auf der Ordinate. Von diesem Punkt aus erhält man über die betreffende Kurve (bzw. Umkehrfunktion) einen Wert für $L_{s,\text{äq}} + L_h$ (Punkt F). Die Differenz aus beiden Werten der Punkte F und C ergibt dann die dazugehö-

$$\begin{aligned}
 \text{extrafoveal: } L_{s,\ddot{a}q} = & 130,64 - 0,0098595 \\
 & \cdot (1,7556 \cdot 10^{10} - 1,5248 \cdot 10^6 \cdot TI \\
 & - 50712 \cdot TI \cdot L_m - 144,52 \cdot TI \cdot L_m^2 \\
 & - 2,6878 \cdot 10^6 \cdot TI \cdot L_h + 10287 \cdot TI \cdot L_h^2 \\
 & - 2,6878 \cdot 10^8 \cdot L_h + 1,0287 \cdot 10^6 \\
 & \cdot L_h^2)^{0,5} - L_h.
 \end{aligned} \tag{28}$$

In der Abbildung 51 und Abbildung 52 sind die typischen Schwellenkurvenverläufe für den erweiterten Funktionszusammenhang $L_{s,\ddot{a}q} = f(TI, L_m, L_h)$ dargestellt. Man sieht, dass der Anstieg der Kurvenfläche für L_h steiler ist als für L_m . Das deutet darauf hin, dass der Einfluss der mittleren Fahrbahnleuchtdichte (entspricht der Netzhautaufhellung) auf die physiologische Blendwirkung deutlich kleiner ist als bisher angenommen (siehe auch [Nar 95]). Man sieht außerdem, dass beim Vergleich von fovealer und extrafovealer Beobachtung dieser Einfluss von L_m aber unterschiedlich groß ausfällt.

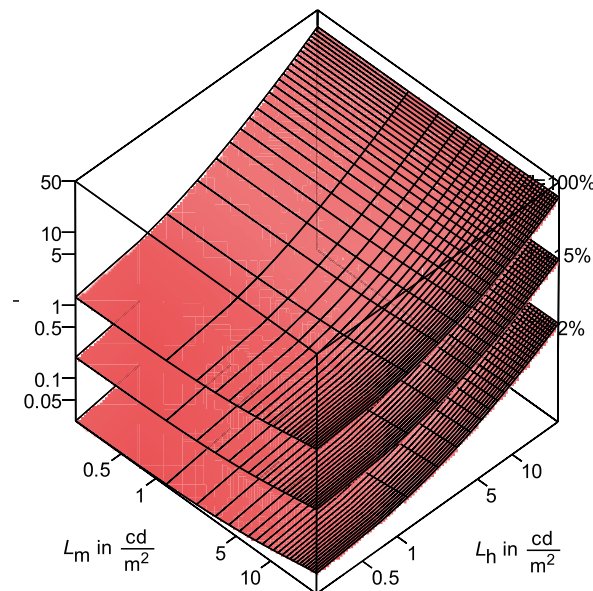


Abbildung 51: Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q}$ in Abhängigkeit von der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m und der Hintergrundleuchtdichte L_h bei den Schwellenwerterhöhungen $TI = 2\%$, 15% und 100% . Parameter: foveal, $t = 0,2\text{ s}$ (Versuchsreihe II)

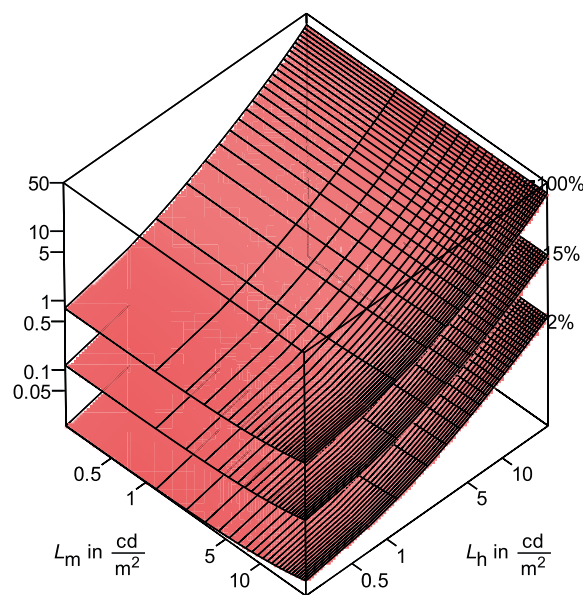


Abbildung 52: Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,äq}$ in Abhängigkeit von der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m und der Hintergrundleuchtdichte L_h bei den Schwellenwerterhöhungen $TI = 2\%$, 15% und 100% . Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), $t = 0,2\text{ s}$ (Versuchsreihe III)

Außerdem sind die Konstanten und Exponenten für die erweiterten Näherungsgleichungen abhängig vom gewählten Definitionsbereich hinsichtlich L_m und L_h . Zur Demonstration dieses Effektes wird die äquivalente Schleierleuchtdichte in Abhängigkeit von zwei Leuchtdichtebereichen, deren untere und obere Grenzen durch die niedrigste und höchste ME-Beleuchtungsklasse gemäß DIN EN 13201 [DIN 04] bestimmt sind, definiert und in Abbildung 53 dargestellt. Für den bei trockener Fahrbahn praktisch hauptsächlich interessierenden Bereich der Straßenleuchtdichten von $0,05\text{ cd/m}^2$ bis 5 cd/m^2 ergibt sich ein kleinerer Anstieg für $L_{s,äq}$ als bei nasser Fahrbahn, die typischerweise einen größeren Leuchtdichtebereich von $0,05\text{ cd/m}^2$ bis 50 cd/m^2 abdeckt. Dieser Sachverhalt kommt insofern Bedeutung zu, als dass er bei der Modellierung zu einer Veränderung der Größe der Konstanten und Exponenten innerhalb der erweiterten Näherungsgleichung für TI führt.

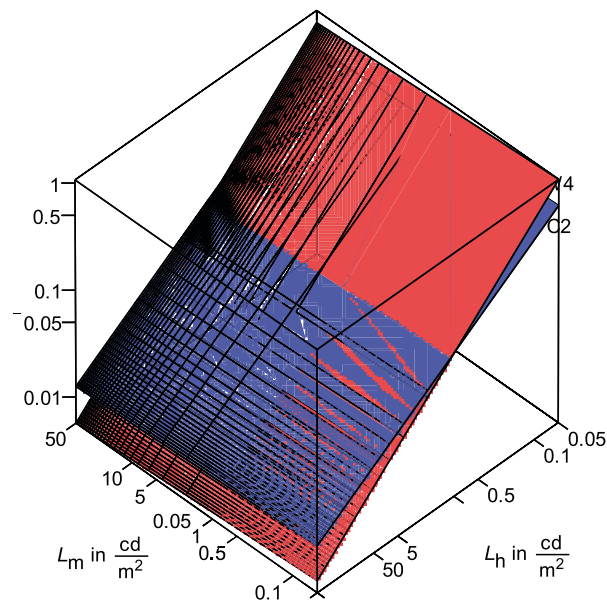


Abbildung 53: Relativer Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,\text{äq}}$ in Abhängigkeit von der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m und der Hintergrundleuchtdichte L_h bei trockener Fahrbahn (C2, [CIE 01]) und nasser Fahrbahn (W4, [CIE 01]) für foveales Sehen

6.3.1 Foveale Näherungsgleichung

Zur Modellierung wird anhand der Schwellenkurven A und B aus der Versuchsreihe II (Abbildung 40 in Kapitel 5.2) die Schwellenkurve C ermittelt, die sich aus der Differenz zwischen der Kurve A und Kurve B ergibt. Diese korrespondiert mit jenem Wert für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle), der allein durch den physikalischen Effekt der Schleierleuchtdichte $L_{s,k}$ verursacht wird (Komponente der Kontrastminderung), durch welche das Objekt im Laborversuch beobachtet wurde. Es wird vorausgesetzt, dass diese Schleierleuchtdichte zwei Leuchtdichten unter praktischen Beleuchtungsbedingungen auf der Straße entspricht: der äquivalenten Schleierleuchtdichte und der Hintergrundleuchtdichte (weil das Auge hierbei zwischen beiden Leuchtdichten nicht unterscheidet) [Nar 95]. Aus diesem Grund wird $L_{s,k}$ als Summe von $L_{s,\text{äq}} + L_h$ in Abbildung 54 verwendet. Des Weiteren wird die im Laborversuch verwendete foveale Adaptationsleuchtdichte L_f (Komponente der Netzhautaufhellung) als mittlere Fahrbahnleuchtdichte L_m angenommen [Nar 95]. Abbildung 54 zeigt den resultierenden Verlauf der Kurve C, welche annähernd einen geraden Anstieg einnimmt.

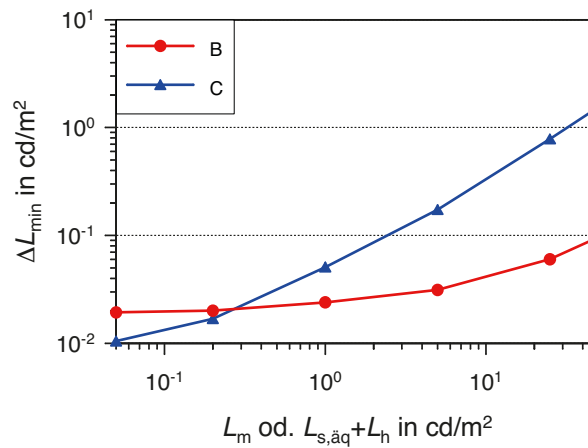


Abbildung 54: Verlauf der Schwellenkurven B und C als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m (Kurve B) und als Funktion der Summe von der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,\text{äq}}$ und Hintergrundleuchtdichte L_h (Kurve C). Parameter: foveal, $\alpha = 10'$, $t = 0,2\text{ s}$

Für die Lösung der Approximationsaufgabe wird zunächst als Ansatzfunktion $y = \varphi(x)$ die folgende Potenzfunktion gewählt, um die Messwerte für die Unterschiedsschwellenwerte am besten anzunähern:

$$y = \varphi(x) = \varphi(x_1, x_2, x_3) = ax_1^b \cdot x_2^c \cdot x_3^d, \quad (29)$$

$$y = \varphi(x) = L_{s,\text{äq}}(TI, L_m, L_h) = a \cdot TI^b \cdot L_m^c \cdot L_h^d.$$

Auf Basis der eigenen Schwellendaten aus der Versuchsreihe II (d. h. Kurven B und C in Abbildung 54 sowie Gleichungen (35) und (36) im Anhang 8.8) und der trockenen Fahrbahn führt die Rücktransformation gemäß Gleichung (23) zu den folgenden Werten bezüglich der gesuchten Parameter a , b , c und d aus Gleichung (29): $a = 0,0246$, $b = 1$ (per Definition), $c = 0,0315$ und $d = 0,5344$. Daraus ergibt sich für den Bereich der Straßenleuchtdichten von $0,05\text{ cd/m}^2$ bis 5 cd/m^2 die folgende approximierte Beziehung für foveales Sehen:

$$TI = TI_{\text{foveal,dry},t=0,2\text{s}} = 41 \cdot \frac{L_{s,\text{äq}}}{L_m^{0,032} \cdot L_h^{0,53}} \%. \quad (30)$$

Der Approximationsfehler ε liegt bei 3,7 %, was für die Praxis ausreichend genau sein dürfte.

Wird dagegen von der nassen Fahrbahn ausgegangen, ruft die Rücktransformation nach Gleichung (23) die folgenden Werte für die Parameter aus Gleichung (29) hervor: $a = 0,0251$, $b = 1$ (per Definition), $c = 0,0379$ und $d = 0,7165$. In diesem Fall wird für den größeren Gültigkeitsbereich der Straßenleuchtdichten zwischen

0,05 cd/m² und 50 cd/m² mit einem Approximationsfehler von 8,7 % die folgende foveale Näherungsgleichung erzeugt:

$$TI = TI_{\text{foveal,wet},t=0,2s} = 40 \cdot \frac{L_{s,\text{äq}}}{L_m^{0,038} \cdot L_h^{0,72}} \% \quad (31)$$

Zur ergänzenden Durchführung der diskreten Ausgleichsrechnung für TI (anstelle von $L_{s,\text{äq}}$, siehe Gleichung (29)) als abhängige Größe wird entsprechend dem Experiment ΔL_{\min} als abhängige Größe verwendet (Anhang 8.9). Damit wird ihre Varianz minimiert und die unabhängige Größe $L_{s,\text{äq}}$ erhält einen eigenen Exponenten (d. h. nicht per Definition gleich 1).

6.3.2 Extrafoveale Näherungsgleichung

Wie im vorigen Kapitel wird zur Modellierung anhand der Schwellenkurven A und B aus der Versuchsreihe III (Abbildung 44 in Kapitel 5.3) die Schwellenkurve C ermittelt, die sich aus der Differenz von Kurve A und B ergibt. Abbildung 55 zeigt den resultierenden Verlauf von Kurve C, welche annähernd einen geraden Anstieg (wie bei den fovealen Schwellenkurven) einnimmt.

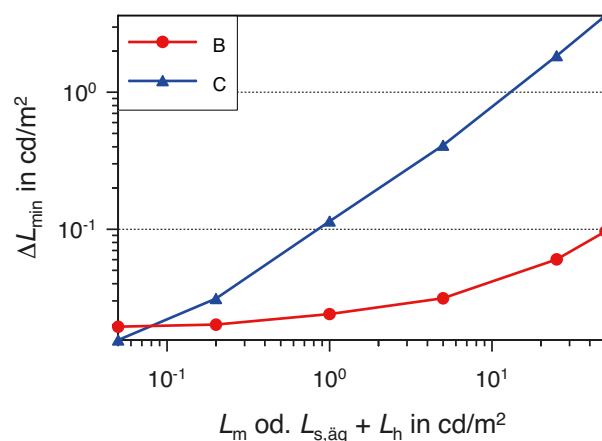


Abbildung 55: Verlauf der Schwellenkurven B und C als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m (Kurve B) und als Funktion der Summe von der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,\text{äq}}$ und Hintergrundleuchtdichte L_h (Kurve C). Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), $\alpha = 10'$, $t = 0,2s$

Für die Lösung der Approximationsaufgabe wird wieder als Ansatzfunktion $y = \varphi(x)$ die Potenzfunktion nach Gleichung (29) gewählt, um die Messwerte für die Unterschiedsschwellenwerte am besten anzunähern.

Basierend auf den eigenen Messdaten der Versuchsreihe III (d. h. Kurven B und C aus Abbildung 55 sowie Gleichungen (38) (39) im Anhang 8.8) und der trockenen Fahrbahn führt die Rücktransformation gemäß Gleichung (23) zu den folgenden Werten bezüglich der Parameter a , b , c und d aus Gleichung (29): $a = 0,0178$, $b = 1$ (per Definition), $c = 0,0149$ und $d = 0,7007$. Die damit verbundene extrafoveale Näherungsgleichung kann für den Bereich der Straßenleuchtdichten von $0,05 \text{ cd/m}^2$ bis 5 cd/m^2 wie folgt angegeben werden (Approximationsfehler $\varepsilon = 3,4 \%$):

$$TI = TI_{\text{extrafoveal,dry},t=0,2s} = 56 \cdot \frac{L_{s,\ddot{a}q}}{L_m^{0,015} \cdot L_h^{0,70}} \% \quad (32)$$

Wird hingegen von der nassen Fahrbahn und damit einhergehend von dem größeren Bereich der Straßenleuchtdichten zwischen $0,05 \text{ cd/m}^2$ und 50 cd/m^2 ausgegangen, ruft die Rücktransformation nach Gleichung (23) die folgenden Werte für die Parameter aus Gleichung (29) hervor: $a = 0,0185$, $b = 1$ (per Definition), $c = 0,0213$ und $d = 0,8122$. In diesem Fall wird bei einem Approximationsfehler von $6,1 \%$ die folgende extrafoveale Näherungsgleichung hervorgebracht:

$$TI = TI_{\text{extrafoveal,wet},t=0,2s} = 54 \cdot \frac{L_{s,\ddot{a}q}}{L_m^{0,021} \cdot L_h^{0,81}} \% \quad (33)$$

Zur ergänzenden Durchführung der diskreten Ausgleichsrechnung für TI (anstelle von $L_{s,\ddot{a}q}$, siehe Gleichung (29)) als abhängige Größe wird hingegen ΔL_{\min} als abhängige Größe verwendet (Anhang 8.9). Damit wird ihre Varianz richtigerweise minimiert und die unabhängige Größe $L_{s,\ddot{a}q}$ erhält einen eigenen Exponenten (d. h. nicht per Definition gleich 1).

6.3.3 Zusammenfassung

Nach diesen Ausführungen lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Überarbeitung der herkömmlichen TI -Formel durch folgende wesentliche Eigenschaften gekennzeichnet ist: Erstens beruht diese auf der stärkeren physikalischen Wirkung des Blendungsschleiers, d. h., dass der Einfluss der wahrgenommenen Kontrastminderung auf die Schwellenwerterhöhung im Blendungsfall berücksichtigt wird („contrast reduction“). Zweitens geht diese nicht mehr von der Vereinfachung aus,

dass der Adaptationszustand bei ungleichmäßiger Leuchtdichteverteilung im Bewertungsfeld nur mithilfe der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m beschrieben wird. Vielmehr berechnet diese zusätzlich die Hintergrundleuchtdichten L_h mit ein, so dass die Adaptationsleuchtdichte bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern korrekter erfasst wird („non-uniform“).

Aufgrund der oben aufgestellten Zusammenhänge kann davon ausgegangen werden, dass in Bezug auf den *TI*-Wert der Einfluss der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m kleiner ausfällt als der von der Hintergrundleuchtdichte L_h und der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,äq}$. Das lässt sich nur begreifen, wenn derjenige Anteil der Schleierüberlagerung infolge Blendung, der zu einer Kontrastminderung führt, als deutlich stärker anerkannt wird.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass die Einbeziehung des peripheren Sehens einen erheblichen Einfluss auf die Konstanten und Koeffizienten der *TI*-Formel und damit auf den *TI*-Wert nimmt.

Die gefundenen Beziehungen gelten für die verwendeten Versuchs- und Modellierungsbedingungen. Dennoch könnte der Grenzfall $L_m = L_h$ beim unmittelbaren Vergleich zwischen herkömmlicher und erweiterter *TI*-Formel ansatzweise Aufschluss geben, inwieweit die Formeln eine Übereinstimmung finden und damit die neuen Formeln belastbar wären. Im vergleichbaren Fall einer trockenen Fahrbahn (Wertebereich von $0,05 \text{ cd/m}^2$ bis 5 cd/m^2) ergibt der Ausdruck im Nenner für die Exponenten einen Summenwert von 0,55 (foveal) und von 0,71 (extrafoveal). Das sind kleinere Werte als der Exponent von 0,8 (foveal/extrafoveal) wie bei der herkömmlichen Formel, auch wenn eher der extrafoveale Fall (aufgrund der bei Blackwell gleichzeitig verwendeten fovealen und extrafovealen Beobachtung) für diesen Vergleich herangezogen werden sollte. Auch die Werte für die Konstanten von 40 (foveal) und 55 (extrafoveal) fallen kleiner aus als der Wert von 65 wie bei der herkömmlichen Formel, wobei wiederum eher der extrafoveale Wert für den Vergleich relevant ist.

Diese Tendenz der kleineren Werte bei den erweiterten Formeln würde nachvollziehbar sein, wenn sich beispielweise die Versuchsbedingungen bei Blackwell als schwerer darstellen würden, was aber aus der Literatur nicht eindeutig ablesbar ist (Darbietungsdauer von 15 s, Sehwinkelgröße von $8'$) [Bla 46]. Die kleinere Sehwin-

kelgröße könnte aber ein wesentlicher Grund dafür sein. Des Weiteren könnte die Tendenz auch dadurch zustande kommen, dass für die Ermittlung des Funktionszusammenhanges $L_{s,\ddot{a}q} = f(TI, L_m, L_h)$ die $L_{s,\ddot{a}q}$ nicht auch auf die L_m angewendet wird und daher der Einfluss des physiologischen Effekts der äquivalenten Schleierleuchtdichte (Komponente der Netzhautaufhellung infolge Blendung) vernachlässigt wird.

Nimmt man beispielsweise an, dass $L_{s,\ddot{a}q} = 0,095 \text{ cd/m}^2$ und $L_m = 0,3 \text{ cd/m}^2$ groß sind, so ergibt sich im vorliegenden Grenzfall für den TI -Wert nach herkömmlicher Formel 16,2 % und nach neuer Formel 12,3 % (extrafoveal). Das entspricht einer Abweichung von ca. 32 %. Je größer L_m , desto kleiner wird die Abweichung: Lediglich 11 % bei einem Wert für L_m von $2,0 \text{ cd/m}^2$.

Obwohl dieser Vergleich mithilfe des Grenzfalls $L_m = L_h$ eher eine theoretische Bedeutung besitzt, liefert er jedoch eine interessante Aussage. Man erkennt, dass die damit erwartbare Abweichung/Genauigkeit in einer Größenordnung liegt, die für die Praxis akzeptabel sein dürfte.

6.4 Berechnungsergebnisse und Diskussion

Ausgehend von den TI -Gleichungen (7), (30), (31), (32) und (33) soll anhand eines typischen Standard-Beleuchtungsbeispiels sowohl die herkömmliche als auch die erweiterte TI -Bewertung für die physiologische Blendung in der Praxis untersucht werden (Lichtpunktabstand = 32 m, Lichtpunkthöhe = 8 m, Fahrbahnbreite = 7 m mit zwei Fahrstreifen, einseitige Anordnung, Beleuchtungsklasse ME3a mit der Anforderung $TI \leq 15 \%$, Standardfahrbahnoberflächen C2 und W4 [CIE 01]).

Für die Berechnung mit den TI -Formeln wird der gewöhnliche (nach EN 13201-3 definierte [DIN 04]) sich in Schritten vorwärtsbewegende Beobachter je Fahrstreifen eingesetzt. Zahl und Abstand der Schritte sind abhängig vom gewählten Lichtpunktabstand.

Darüber hinaus wird für die TI -Berechnung mit der herkömmlichen Gleichung (7) eine (nach EN 13201-3 definierte [DIN 04]) Beobachtungsgeometrie mit konstant gehaltener Blickrichtung längs der Straße benutzt. Hingegen wird bei den erweiterten Gleichungen (30), (31), (32) und (33) eine Beobachtung mit variabler Blickrich-

tung je Beobachterstandort verwendet. Variabel heißt hierbei, dass der Beobachter auf jeden Berechnungspunkt im Bewertungsfeld blickt und unter der vereinfachten Annahme, dass die Hintergrundleuchtdichte L_h der vorliegenden Einzelleuchtdichte im Berechnungspunkt/Rasterpunkt entspricht, der TI -Wert berechnet wird.

Weiterhin ist zu erwähnen, dass eine direkte Blendung durch die Leuchten berücksichtigt wird. Die indirekte Blendung insbesondere durch Reflexionsbilder von den Leuchten, wie sie auf der nassen Fahrbahn auftreten können, wird jedoch nicht einberechnet. Wie bei der herkömmlichen Berechnung wird der höchste ermittelte TI -Wert für jede Position des Beobachters für die weitere Auswertung zugrunde gelegt.

Abbildung 56 stellt die Ergebnisse für die C2-Straße (trockene Fahrbahn) basierend auf den Gleichungen (7), (30) und (32) dar [Sto 14] [Sto 15a]. Aus dem Kurvenverlauf ist zu erkennen, dass der maximal auftretende Wert für TI am Beobachterstandort 1 nach herkömmlicher Gleichung (7) 14,8 % groß ist. Damit wäre die Beleuchtungsanlage normgerecht ausgelegt. Nach erweiterter Gleichung (30) für foveales Sehen ergibt sich am selben Beobachterstandort hingegen ein geringerer Wert für TI von 11,4 %. Ein Grund für diesen Unterschied liegt in der adaptionsbestimmenden Größe L_h , die in den variablen Blickrichtungen im Bewertungsfeld kleiner und größer als der Wert für L_m nach Gleichung (7) ausfällt. Bei Verwendung der erweiterten Gleichung (32) für peripheres Sehen wird ebenso abweichend ein höherer Wert für TI von 16,6 % am Beobachterstandort 1 hervorgerufen. Der Grund für dieses relative Verhalten resultiert wahrscheinlich aus dem höheren Wert von 56 für die Konstante.

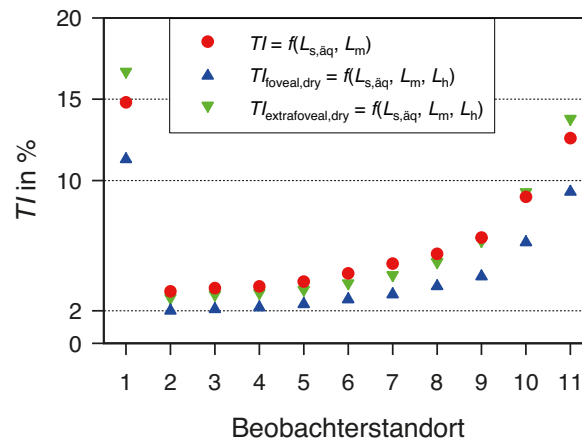


Abbildung 56: Vergleich zwischen den Werten für TI nach herkömmlicher Gleichung (7) und erweiterten Gleichungen (30) und (32) für die trockene Fahrbahn an den Beobachterstandorten des sich vorwärtsbewegenden Beobachters. Der anfängliche Beobachterstandort hat die Nummer 1

Abbildung 57 zeigt den Vergleich der TI -Werte für die W4-Straße (nasse Fahrbahn) basierend auf den Gleichungen (7), (31) und (33) [Sto 14] [Sto 15a]. Betrachtet man die Ergebnisse, so kann erkannt werden, dass hierbei die Abweichungen zwischen der herkömmlichen TI -Formel und den erweiterten Formeln deutlich größer ausfallen als auf trockener Fahrbahn. Der relevante Maximalwert für TI am Beobachterstandort 1 nach herkömmlicher Gleichung (7) beträgt lediglich 8,5 %, wogegen er nach erweiterter Gleichung (31) für foveales Sehen tatsächlich 22,1 % groß ist. Die Blendungsvariante mit erweiterter Gleichung (33) für peripheres Sehen liefert im Ergebnis einen absoluten Maximalwert für TI von 34,4 %. Es scheint, dass in beiden Varianten die Leuchte deutlich zu schwach entblendet wäre. Der wesentliche Grund für diese großen Unterschiede liegt in der adaptationsbestimmenden Größe L_h die in den variablen Blickrichtungen im Bewertungsfeld deutlich kleiner und größer als der Wert für L_m nach Gleichung (7) ausfällt.

Aufgrund dieser deutlichen Abweichungen ist die hohe praktische Relevanz der erweiterten TI -Formeln ersichtlich, und dass die herkömmliche TI -Formel zu Fehlurteilen führt und insbesondere für die nasse Fahrbahn nicht anwendbar ist (Kapitel 2.3).

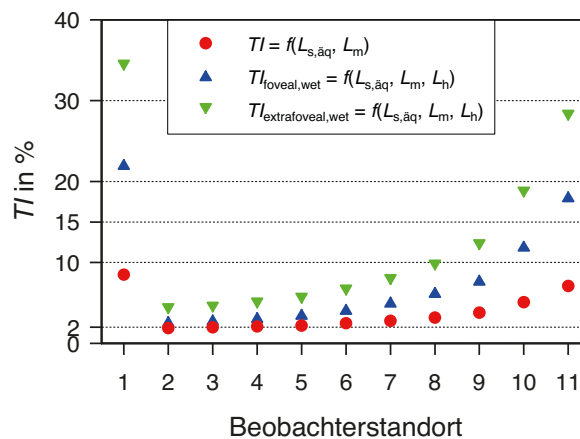


Abbildung 57: Vergleich zwischen den Werten für TI nach herkömmlicher Gleichung (7) und erweiterten Gleichungen (31) und (33) für die nasse Fahrbahn an den Beobachterstandorten

Gleichfalls interessant scheint die Frage, wie weit sich der höchste Wert für TI verändert, wenn anstelle der erweiterten Gleichungen (30) (32) für TI_{dry} die allgemeineren Gleichungen (31) (33) für TI_{wet} auch auf trockenen Fahrbahnen einheitlich angewendet werden würden, was bedeutet, dass dadurch ein größerer Gültigkeitsbereich vorliegen würde. Diesen Vorgang zeigt Abbildung 58 [Sto 14] [Sto 15a]. Hierbei ist zu erkennen, dass die Werte für TI_{wet} nur geringfügig bzw. nicht abweichen, und zwar von 11,4 auf 11,8 % bei fovealem Sehen bzw. von 16,6 auf 16,6 % bei peripherem Sehen. Demzufolge beeinflusst die Ausweitung des Gültigkeitsbereiches den Wert für TI nicht mehr wesentlich. Das Ergebnis ist daher geeignet, die normative Anwendung der allgemeineren TI_{wet} -Formel sowohl für die nasse als auch trockene Fahrbahn zu empfehlen.

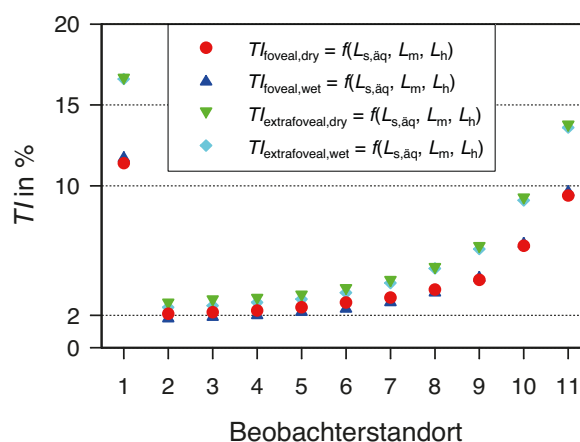


Abbildung 58: Vergleich zwischen den Werten für TI nach den erweiterten Gleichungen (30) und (32) für foveales Sehen sowie den erweiterten Gleichungen (31) und (33) für peripheres Sehen für die trockene Fahrbahn an den Beobachterstandorten

Abschließend bleibt festzustellen, dass die Berechnungsergebnisse geeignet sind, die Auswirkung der Anwendung sowohl der Werte für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit wahrgenommener Kontrastminderung als auch der Werte der Hintergrundleuchtdichte zur genaueren Wiedergabe der ungleichmäßigen Leuchtdichteverteilung auf die physiologische Blendungsbewertung nachzuweisen.

Der Vergleich zwischen den berechneten Schwellenwerterhöhungen nach herkömmlicher *TI*-Formel und den erweiterten Formeln ergibt deutliche Abweichungen. Beachtenswert scheint, dass die Höhe der Abweichung auch von der Leuchtdichteverteilung im Bewertungsfeld selbst abhängt. Je größer diese Leuchtdichteunterschiede sind, desto ausgeprägter sind die Abweichungen bei der *TI*-Berechnung, wobei der neue Wert für *TI* kleiner oder größer als der herkömmliche sein kann. Bei weniger inhomogenen Leuchtdichteverteilungen (wie z. B. auf trockener Fahrbahn) kann man von einer Abweichung $\geq 20\%$ ausgehen. Inhomogenere Verteilungen (wie typischerweise bei nasser Fahrbahn) können dahingegen eine Abweichung $\geq 200\%$ zwischen beiden Ansätzen verursachen. Die herkömmliche *TI*-Formel sollte und kann deshalb auf nasser Fahrbahn nicht angewendet werden, was dem heutigen Stand der DIN EN Norm entspricht [DIN 04].

Damit verbunden zeigen die Berechnungsergebnisse, dass sich Kebschull's leitende Forderung nach gleichbleibenden Sehverhältnissen bei nasser und trockener Fahrbahn mit der Anwendung der erweiterten *TI*-Formeln im Hinblick auf die Begrenzung der physiologischen Blendung besser erfüllen lässt als mit der herkömmlichen Formel. Die allseits bestehende Sicherheitslücke hinsichtlich der Blendwirkung auf nasser Straße kann damit besser geschlossen werden (Kapitel 1.1).

Ebenfalls scheint es bemerkenswert, dass die Höhe der Abweichung maßgebend von der Exzentrizität bzgl. Blickrichtung abhängt. Die deutliche Zunahme der Unterschiede erklärt sich aus dem Umstand, dass im Vergleich zur fovealen die periphere Detektion von Hindernissen nur durch eine Erhöhung des Wertes für die Unterschiedsschwelle möglich ist. Im Umkehrschluss bedeutet dies für den ermittelten Wert für *TI*, dass dieser vergleichsweise größer sein muss (Kapitel 6.3.3), was bei dessen Einhaltung zu einer stärkeren Entblendung der Leuchte führen würde, womit sich die Tarnzonen im Bewertungsfeld weiter verkleinern würden.

In diesem Wert für TI ist ebenso der periphere Einfluss auf den Praxisfaktor in Abhängigkeit der Leuchtdichte enthalten. Wie im Kapitel 3.3 dargelegt, sollte eine lichttechnische Dimensionierung der Straßenbeleuchtungsanlage den Praxisfaktor jedenfalls einberechnen, um die Tarnzonen zu verkleinern und daher das Sichtbarkeitsfeld zu vergrößern. Das Ergebnis ist deshalb besonders geeignet, eine normative Anwendung der Gleichungen (32) bzw. (33) für peripheres Sehen zu empfehlen.

Abschließend sei noch die für die Berechnung nach herkömmlicher TI -Formel und den erweiterten TI -Formeln verwendete Software erwähnt: LCI Light Consult International Programm STL364 [Sto 15b].

6.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aufgrund der deutlichen Veränderung zum Ergebnis der bisherigen TI -Methode der neuartige, erweiterte Ansatz für eine korrektere quantitative Erfassung der physiologischen Blendung in der Straßenbeleuchtung geeignet ist. Grund: Die Berechnung der Schwellenwerterhöhung nach den erweiterten TI -Formeln ist wahrnehmungsgerechter und hat eine hohe praktische Relevanz, weil sie zum einen die zugleich wahrgenommene Kontrastminderung infolge Blendung neuartig einbezieht und zum anderen die ungleichmäßige Leuchtdichteverteilung im DIN-Bewertungsfeld korrekter einberechnet. Deshalb werden die erweiterten Formeln für TI zur Anwendung in der Beleuchtungspraxis empfohlen.

Aus Sicht der Sehsicherheit und der damit verbundenen Reduzierung der Tarnzonen ist es ebenso empfehlenswert, die periphere Näherungsgleichung (33) (mit dem Gültigkeitsbereich von $0,05 \text{ cd/m}^2$ bis 50 cd/m^2) gegenüber der fovealen Näherungsgleichung (31) generell zu favorisieren, um das Sichtbarkeitsfeld weiter zu vergrößern. So wird die Detektion auch von peripheren Hindernissen auf nasser und trockener Straße bei Blendung verbessert.

7 Fazit und Ausblick

In der Einleitung der vorliegenden Arbeit wird festgestellt, dass die heutige *TI*-Formel aus den 1970er-Jahren nach Eichhoff und das *TI*-Berechnungsverfahren nach EN 13201 bzw. DIN EN 13201-3 nicht geeignet sind, die physiologische Blendwirkung korrekt zu beschreiben. Der Grund für dieses Versagen resultiert zum einen aus den zugrunde liegenden Daten nach Blackwell/Adrian für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (analog zur Unterschiedsschwelle), die die zugleich wahrgenommene Kontrastminderung infolge Blendungsschleier unberücksichtigt lassen und zum anderen aus den vereinfachten Annahmen nach Eichhoff/DIN, dass sich die Adaptationsleuchtdichte des Beobachters als die mittlere Fahrbahnleuchtdichte bestimmen lässt und dass die Blickrichtung des Fahrzeugführers/Beobachters zur Straßenachse parallel ist.

Der Stand der Technik macht es wahrscheinlich, dass die zukünftige Leuchtenentwicklung eine Entblendung von Straßen- bzw. Außenleuchten verbessern wird. Dafür sind neue Formeln und Berechnungsverfahren notwendig, die die tatsächlichen Wahrnehmungs- und Beobachtungsbedingungen korrekter als bisher widerspiegeln und daher bei der *TI*-Blendungsbewertung zu weniger Fehlurteilen führen. Eine theoretische Basis für solchartige neuen Formeln stellt eine grundlegende Schwellenuntersuchung nach Narisada dar, welche die Unterschiedsschwelle mit Blendungsschleier, also mit zugleich wahrgenommener Kontrastminderung infolge Blendung berücksichtigt.

In Kapitel 5.1 zur Narisada-Replikation (Versuchsreihe I) zeigen die eigenen Untersuchungsergebnisse, dass die Messdaten zu den Unterschiedsschwellen mit Blendungsschleier mit dem Ur-Versuch zur Schwellenmessung von Narisada vergleichbar sind. Sein gefundenes experimentelles Ergebnis aus dem Jahre 1977 kann daher erstmals bekräftigt werden und als replizierbar gelten. Die deutliche Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle mit Blendungsschleier von der zugleich wahrgenommenen Kontrastminderung infolge Blendung (physikalischer Effekt der Schleierleuchtdichte) macht zudem deutlich, dass mit dieser Methode ein realistisches Modell zur Bewertung der physiologischen Blendung vorliegt. So ist der Anstieg bzgl. des Schwellenwertes relativ groß gegenüber dem Wert des konventionellen Schwellenmodells nach Adrian, das ohne den physikalischen Effekt der

Schleierleuchtdichte arbeitet, und ein Vergleich mit dessen Schwellendaten ergibt keine Übereinstimmung.

In Kapitel 5.2 zur fovealen Antwort (Versuchsreihe II) wird nachgewiesen, dass der Wert für die Unterschiedsschwellen mit Blendungsschleier bei abnehmender Darbietungsdauer im Mittel zunimmt. Ein Vergleich mit den Adrian-Schwellenwerten verdeutlicht, dass keine Übereinstimmung hinsichtlich dieser Zunahme erreicht wird. Der übliche Zeitfaktor nach Adrian ist daher nicht auf die eigenen Werte für die Unterschiedsschwelle mit Blendungsschleier anwendbar.

In Kapitel 5.3 zur extrafovealen Antwort (Versuchsreihe III) wird gezeigt, dass im Vergleich zur fovealen Detektion der Wert für die extrafoveale Unterschiedsschwelle mit Blendungsschleier deutlich wächst. Eine Abhängigkeit der extrafovealen Unterschiedsschwelle mit Blendungsschleier wird von der Darbietungsart daher nachgewiesen. Ein Vergleich mit den Schwellendaten nach Adrian zeigt ferner, dass eine relativ gute Übereinstimmung bei der Schwellenerhöhung erreicht wird. Der damit verbundene eigene Einflussfaktor im Hinblick auf den Praxisfaktor liegt zwischen 1,4 und 2,3. Im Vergleich zur Abschätzung seitens Narisada oder Hentschel fällt er aber etwas kleiner aus.

In Kapitel 6 zur Überarbeitung der *TI*-Blendungsformel werden erstmals neuartige, erweiterte Formeln und ein neu definiertes Berechnungsverfahren vorgeschlagen. Die Berechnungsergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass im Gegensatz zur herkömmlichen Formel die erweiterten Formeln für die nasse Fahrbahn korrekter anwendbar sind. Die leitende Forderung von Kebschull nach gleichbleibenden Sehverhältnissen auf nasser und trockener Fahrbahn kann damit besser erfüllt werden. Zudem zeigen die Berechnungsergebnisse, dass die erweiterte Näherungsformel für peripheres Sehen eine striktere Forderung nach Entblendung der Beleuchtungsanlage bzw. Leuchten ergibt als die erweiterte Formel für foveales Sehen. Diejenige extrafoveale Näherungsformel, die für den Gültigkeitsbereich von $0,05 \text{ cd/m}^2$ bis 50 cd/m^2 definiert ist, wird deshalb zur einheitlichen Anwendung sowohl für nasse als auch trockene Straßen empfohlen.

Heutige und zukünftige Grundlage zur Ermittlung der physiologischen Blendung sollte die Berechnung der Schwellenwerterhöhung mithilfe der in dieser Arbeit ent-

wickelten *TI*-Formeln sein. Eine zukünftige Entwicklung könnte beispielsweise die folgenden Punkte in Betracht ziehen:

- Aufgrund der eigenen Messergebnisse scheint es sinnvoll, die Parameter weiterführend zu untersuchen. Beispielsweise wären die Bereiche für Leuchtdichte und Exzentrizität bzgl. Blickrichtung nach unten und oben praxisgerecht zu erweitern.
- Um die Schwellenmethode nach Narisada weiter zu untermauern, wäre eine Validierung an realen Blendlichtquellen mithilfe eines Methodenvergleiches empfehlenswert. Es ist zu erwarten, dass die gemessenen Werte für die Unterschiedsschwelle eher den Schwellenwerten von Narisada bzw. den eigenen als den berechneten Schwellenwerten nach Adrian entsprechen.
- Zur Erweiterung der Aussagefähigkeit der Schwellenmethode nach Narisada ist es wünschenswert, wichtige Einflussparameter wie Objektgröße, Darbietungsdauer und Alter weiterführend zu untersuchen.

8 Anhang

8.1 Versuchsfelder in der Praxis

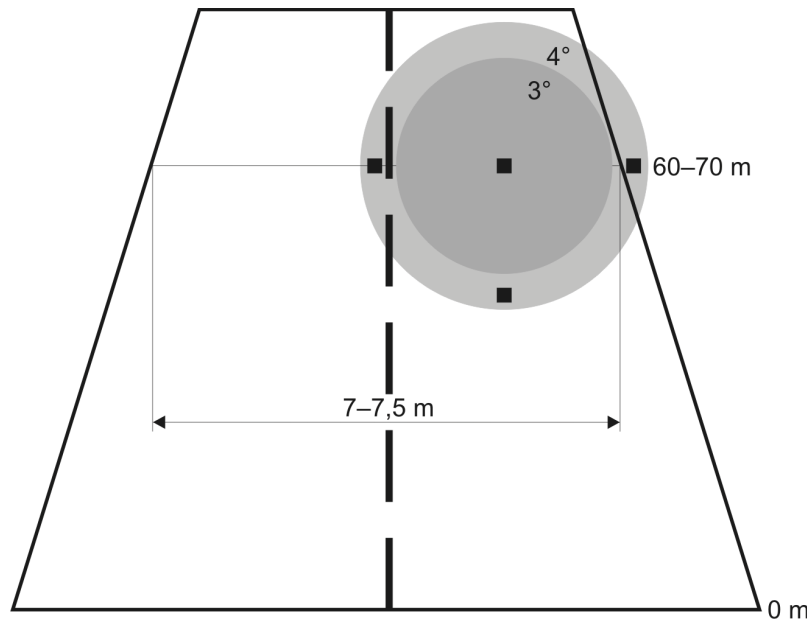


Abbildung 59: Erfasster Raumwinkel der Versuchsfelder für die foveale (3°) und extrafoveale (4°) Beobachtung im Hinblick auf einer zugrunde liegenden typischen, europäischen Stadtverkehrsstraße mit einer Fahrbahnbreite von 7 m bis 7,5 m. Die Blickrichtung entspricht der Mitte einer Fahrspur, wobei die Blicklinie die Fahrbahn in einer Entfernung von 60–70 m kreuzt.

8.2 Zeitliche Stabilität der Projektoren

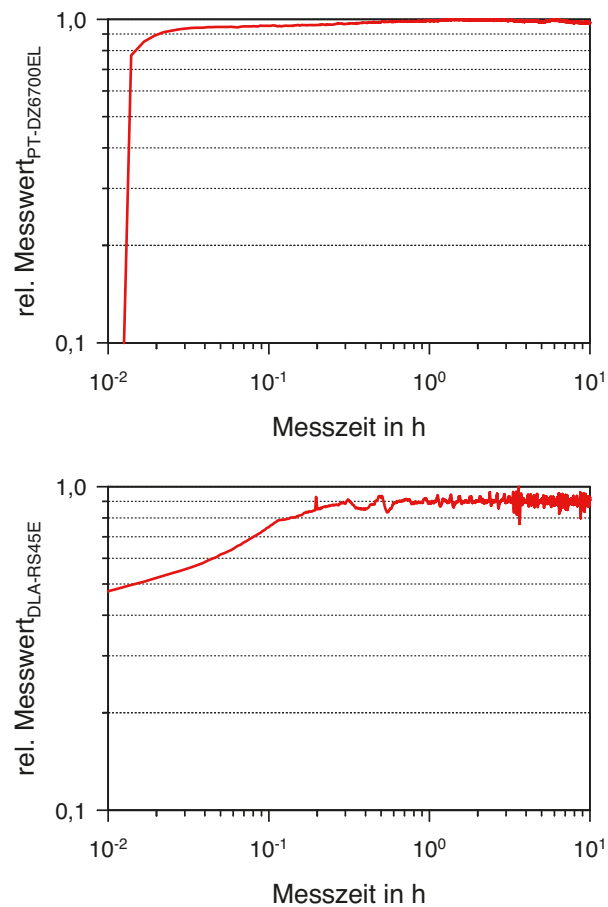


Abbildung 60: Messdaten für die Zeitreihe des relativen Lichtstroms der beiden Projektoren PT-DZ6700EL ($0,99 \pm 0,007$) und DLA-RS45E ($0,89 \pm 0,035$). PT-DZ6700EL (Projektor 1) wird für das Adaptationsfeld/Schleierfeld und DLA-RS45E (Projektor 2) zur Darbietung des Objekts mit Hintergrund verwendet

8.3 Zeitlicher Ablauf der Testserien A und B

Testserie-A					Testserie-B				
Versuchsphase	Zeitpunkt	Schleierfeld	Objekt	Antwort	Versuchsphase	Zeitpunkt	Schleierfeld	Objekt	Antwort
Dunkeladaptation	0-15 min				Dunkeladaptation	0-15 min			
Voradaptation	15-17 min				Voradaptation	15-17 min			
Testintervall zur Darbietung eines Leuchtdichteunterschiedes mit $t = 0,2$ s	0 s				Testintervall zur Darbietung eines Leuchtdichteunterschiedes mit $t = 0,2$ s	0 s			
	0,1 s					0,1 s			
	0,2 s					0,2 s			
	0,3 s					0,3 s			
	0,4 s					0,4 s			
	0,5 s					0,5 s			
	0,6 s					0,6 s			
	0,7 s					0,7 s			
	0,8 s					0,8 s			
	0,9 s					0,9 s			
	1 s					1 s			
	1,1 s					1,1 s			
	1,2 s					1,2 s			
	1,3 s					1,3 s			
	1,4 s					1,4 s			
	1,5 s					1,5 s			
	1,6 s					1,6 s			
	1,7 s					1,7 s			
	1,8 s					1,8 s			
	1,9 s					1,9 s			
	2 s					2 s			
	2,1 s					2,1 s			
	2,2 s					2,2 s			
	2,3 s					2,3 s			
	2,4 s					2,4 s			
	2,5 s					2,5 s			
	2,6 s					2,6 s			
	2,7 s					2,7 s			
	2,8 s					2,8 s			
	2,9 s					2,9 s			
	3 s					3 s			
						3,1 s			
						3,2 s			
						3,3 s			
						3,4 s			
						3,5 s			
						3,6 s			
						3,7 s			
						3,8 s			
						3,9 s			
						4 s			
						4,1 s			
						4,2 s			
						4,3 s			
						4,4 s			
						4,5 s			
						4,6 s			
						4,7 s			
						4,8 s			
						4,9 s			
						5 s			

Abbildung 61: Ablauf der Untersuchung mit den Testserien A und B. Jede Sitzung enthielt eine 15-minütige Dunkeladaptation. Je Leuchtdichtestufe wurde eine 2-minütige Voradaptation auf die jeweilige Leuchtdichte vorgenommen, bevor das entsprechende Testintervall wiederholt durchgeführt wurde. Die Testintervalle mit einer Gesamtdauer von 3 s (Testserie-A) oder 5 s (Testserie-B) beinhalteten die Darbietung des Schleier-/Adaptationsfeldes und Objektes (hier $t = 0,2$ s) sowie ein Zeitfenster von 2 s für die Antwort der Versuchsperson

8.4 Zur Überprüfung der Normalverteilung

Tabelle 8: Ergebnisse für die berechnete Irrtumswahrscheinlichkeit p für alle Testfälle, den dazugehörigen Leuchtdichten L_a und Testserien A und B basierend auf dem Kolmogorov-Smirnov-Test bzw. Shapiro-Wilk-Test*

Testfall	Leuchtdichte L_a	Testserie-A p	Testserie-B p
Personenfehler: 2-h-Ermüdung	5,0	0,2	0,2
Personenfehler: 3-m-Zeitraum	1,0	0,216*	0,2
Feldgrößenfehler: 3°-Feld vs. 4°-Feld	5,0	3°: 0,2 4°: 0,2	3°: 0,2 4°: 0,2
Exzentrizität bei Testserie-B: foveale Antwort versus extra- foveale Antwort	0,20		foveal: 0,2 extrafoveal: 0,145
	1,0		foveal: 0,2 extrafoveal: 0,081
	5,0		foveal: 0,2 extrafoveal: 0,081
	25		foveal: 0,2 extrafoveal: 0,084

8.5 Schwellenwerte der Versuchsreihe I

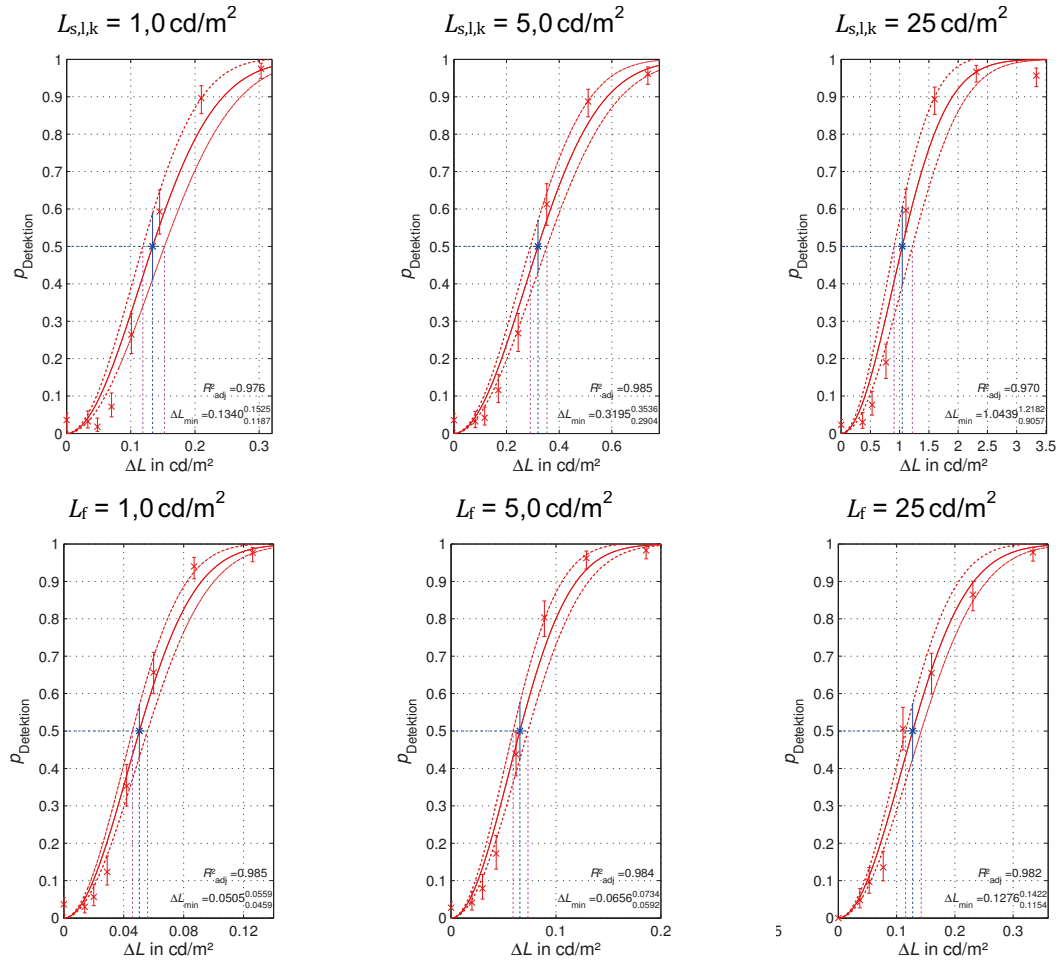
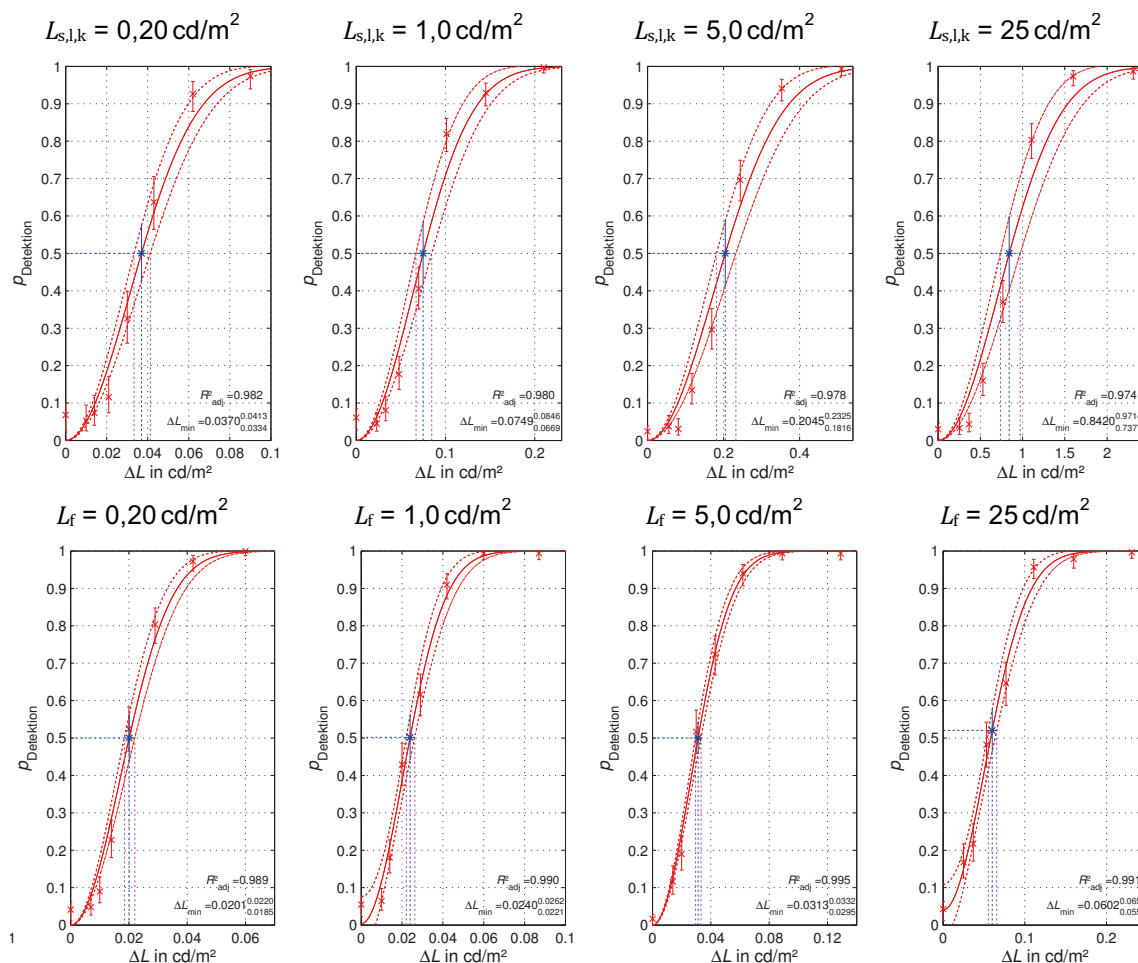


Abbildung 62: Antwortkurven aus der Versuchsreihe I von Versuchspersonengruppen für die Detektion verschiedener Leuchtdichteunterschiede ΔL (Reizintensitäten) bei der Testserie-A (für Kurve A) und bei der Testserie-B (für Kurve B). Parameter: foveal, $t = 0,12 \text{ s}$, Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ bzw. L_f mit $1,0 \text{ cd/m}^2$, $5,0 \text{ cd/m}^2$ und 25 cd/m^2

Tabelle 9: Schwellenwert-Tabelle für Versuchsreihe I

Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ bzw. L_f in cd/m^2	1.0	5.0	25
Kurve A (ΔL_{min} in cd/m^2)	0.1340	0.3195	1.0439
Kurve A (Obergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{min} in cd/m^2)	0.1525	0.3536	1.2182
Kurve A (Untergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{min} in cd/m^2)	0.1187	0.2904	0.9057
Kurve A (R^2_{adj})	0.976	0.985	0.970
Kurve B (ΔL_{min} in cd/m^2)	0.0505	0.0656	0.1276
Kurve B (Obergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{min} in cd/m^2)	0.0559	0.0734	0.1422
Kurve B (Untergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{min} in cd/m^2)	0.0459	0.0592	0.1154
Kurve B (R^2_{adj})	0.985	0.984	0.982

8.6 Schwellenwerte der Versuchsreihe II



Abbildungung 63: Antwortkurven aus der Versuchsreihe II von Versuchspersonengruppen für die Detektion verschiedener Leuchtdichteunterschiede ΔL (Reizintensitäten) bei der Testserie-A (für Kurve A) und bei der Testserie-B (für Kurve B). Parameter: foveal, $t = 0,2 \text{ s}$, Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ bzw. L_f mit $0,20 \text{ cd/m}^2$, $1,0 \text{ cd/m}^2$, $5,0 \text{ cd/m}^2$ und 25 cd/m^2

Tabelle 10: Schwellenwert-Tabelle für Versuchsreihe II

Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ bzw. L_f in cd/m^2	0.20	1.0	5.0	25
Kurve A (ΔL_{min} in cd/m^2)	0.0370	0.0749	0.2045	0.8420
Kurve A (Obergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{min} in cd/m^2)	0.0413	0.0846	0.2325	0.9714
Kurve A (Untergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{min} in cd/m^2)	0.0334	0.0669	0.1816	0.7377
Kurve A (R^2_{adj})	0.982	0.980	0.978	0.974
Kurve B (ΔL_{min} in cd/m^2)	0.0201	0.0240	0.0313	0.0602
Kurve B (Obergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{min} in cd/m^2)	0.0220	0.0262	0.0332	0.0656
Kurve B (Untergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{min} in cd/m^2)	0.0185	0.0221	0.0295	0.0555
Kurve B (R^2_{adj})	0.989	0.990	0.995	0.991

8.7 Schwellenwerte der Versuchsreihe III

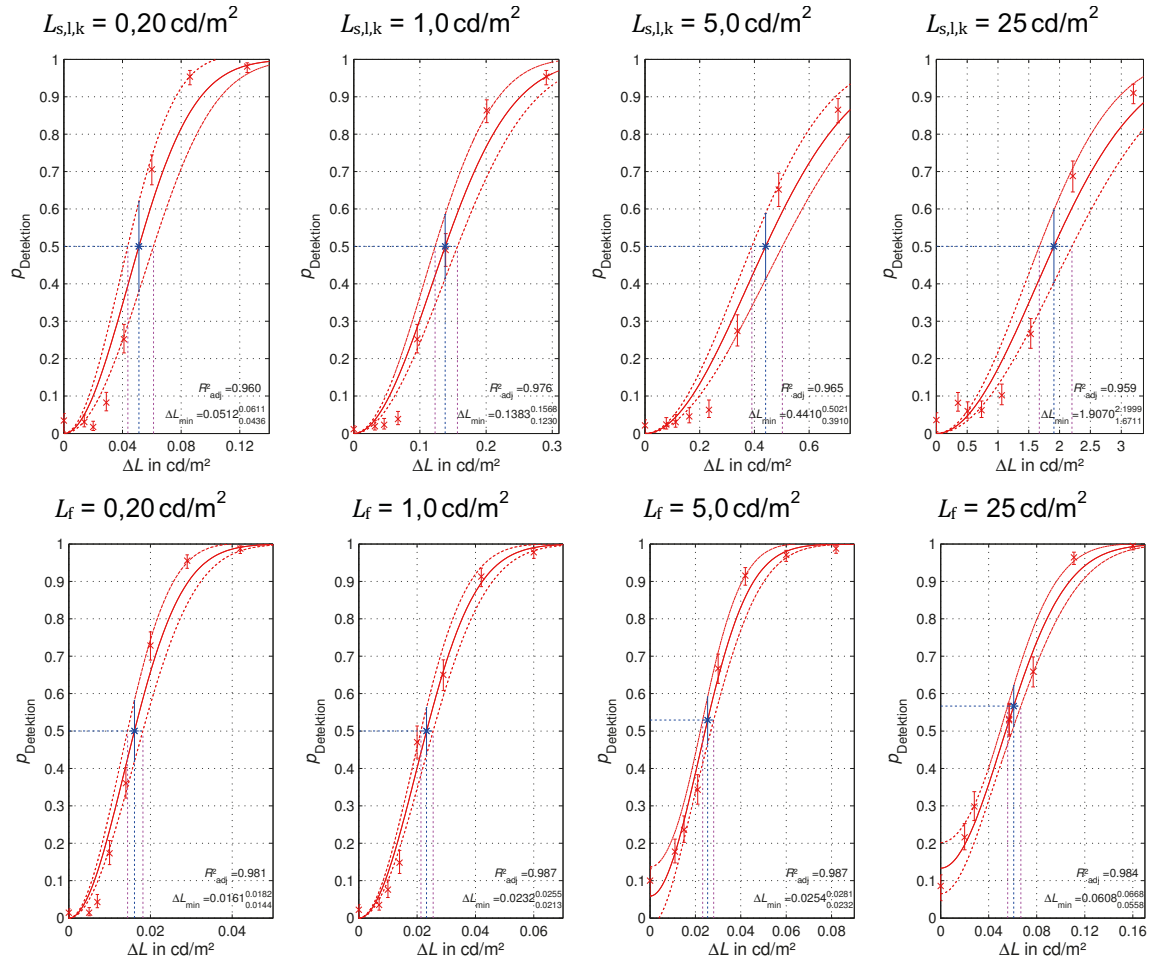


Abbildung 64: Antwortkurven aus der Versuchsreihe III von Versuchspersonengruppen für die Detektion verschiedener Leuchtdichteunterschiede ΔL (Reizintensitäten) bei der Testserie-A (für Kurve A) und bei der Testserie-B (für Kurve B). Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), $t = 0,2$ s, Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ bzw. L_f mit $0,20 \text{ cd/m}^2$, $1,0 \text{ cd/m}^2$, $5,0 \text{ cd/m}^2$ und 25 cd/m^2

Tabelle 11: Schwellenwert-Tabelle für Versuchsreihe III

Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ bzw. L_f in cd/m^2	0.20	1.0	5.0	25
Kurve A (ΔL_{\min} in cd/m^2)	0.0512	0.1383	0.4410	1.9070
Kurve A (Obergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{\min} in cd/m^2)	0.0611	0.1568	0.5021	2.1999
Kurve A (Untergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{\min} in cd/m^2)	0.0436	0.1230	0.3910	1.6711
Kurve A (R^2_{adj})	0.960	0.976	0.965	0.959
Kurve B (ΔL_{\min} in cd/m^2)	0.0161	0.0232	0.0254	0.0608
Kurve B (Obergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{\min} in cd/m^2)	0.0182	0.0255	0.0281	0.0668
Kurve B (Untergrenze 95%-Konfidenzint. ΔL_{\min} in cd/m^2)	0.0144	0.0213	0.0232	0.0558
Kurve B (R^2_{adj})	0.981	0.987	0.987	0.984

8.8 Zur linearen Interpolation der Schwellenwertkurven

Versuchsreihe II (foveal), Kurve A:

$$y = 0,027525 + 0,047375x, \quad x < 1 \quad (34)$$

$$y = 0,042500 + 0,032400x, \quad x < 5$$

$$y = 0,045125 + 0,031875x, \quad \text{sonst.}$$

Versuchsreihe II (foveal), Kurve B:

$$y = 0,019125 + 0,004875x, \quad x < 1 \quad (35)$$

$$y = 0,022175 + 0,001825x, \quad x < 5$$

$$y = 0,0240750 + 0,001445x, \quad \text{sonst.}$$

Versuchsreihe II (foveal), Kurve C:

$$y = 0,084000 + 0,042500x, \quad x < 1 \quad (36)$$

$$y = 0,020325 + 0,030575x, \quad x < 5$$

$$y = 0,021050 + 0,030430x, \quad \text{sonst.}$$

Versuchsreihe III (extrafoveal), Kurve A:

$$y = 0,029425 + 0,108875x, \quad x < 1 \quad (37)$$

$$y = 0,062625 + 0,075675x, \quad x < 5$$

$$y = 0,074500 + 0,073300x, \quad \text{sonst.}$$

Versuchsreihe III (extrafoveal), Kurve B:

$$y = 0,019125 + 0,004875x, \quad x < 1 \quad (38)$$

$$y = 0,022175 + 0,001825x, \quad x < 5$$

$$y = 0,0240750 + 0,001445x, \quad \text{sonst.}$$

Versuchsreihe III (extrafoveal), Kurve C:

$$y = 0,010300 + 0,104000x, \quad x < 1 \quad (39)$$

$$y = 0,040450 + 0,073850x, \quad x < 5$$

$$y = 0,050425 + 0,071855x, \quad \text{sonst.}$$

8.9 Näherungsgleichungen mit Minimierung der Varianz von ΔL_{\min}

Foveale Näherungsgleichung, trockene Fahrbahn:

$$TI = TI_{\text{foveal,dry},t=0,2s} = 40 \cdot \frac{L_{s,\ddot{a}q}^{0,98}}{L_m^{0,031} \cdot L_h^{0,52}} \% \quad (40)$$

Foveale Näherungsgleichung, nasse Fahrbahn:

$$TI = TI_{\text{foveal,wet},t=0,2s} = 39 \cdot \frac{L_{s,\ddot{a}q}^{0,99}}{L_m^{0,037} \cdot L_h^{0,71}} \% \quad (41)$$

Extrafoveale Näherungsgleichung, trockene Fahrbahn:

$$TI = TI_{\text{extrafoveal,dry},t=0,2s} = 55 \cdot \frac{L_{s,\ddot{a}q}^{0,98}}{L_m^{0,015} \cdot L_h^{0,69}} \% \quad (42)$$

Extrafoveale Näherungsgleichung, nasse Fahrbahn:

$$TI = TI_{\text{extrafoveal,wet},t=0,2s} = 54 \cdot \frac{L_{s,\ddot{a}q}^{0,99}}{L_m^{0,021} \cdot L_h^{0,81}} \% \quad (43)$$

9 Literaturverzeichnis

- [Adr 61a] Adrian W. (1961): Der Einfluss störender Lichter auf die extrafoveale Wahrnehmung des menschlichen Auges. In: Lichttechnik 13, Nr. 9, S. 450f.
- [Adr 61b] Adrian W. (1961): Der Einfluss störender Lichter auf die extrafoveale Wahrnehmung des menschlichen Auges. In: Lichttechnik 13, Nr. 11, S. 508f u. S. 558f.
- [Adr 64] Adrian W. (1964): Zur Blendungsbewertung bei der Beleuchtung von Straßen. In: Lichttechnik 16, Nr. 11, S. 541f.
- [Adr 65] Adrian W., Eberbach K. (1965): Zur Frage der psychologischen Blendung in der Straßenbeleuchtung. In: Lichttechnik 17, Nr. 11, S. 137A.
- [Adr 69a] Adrian W. (1969): Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. Lichttechnik 21 (1), S. 2A–7A.
- [Adr 69b] Adrian W., Eberbach K. (1969): On the relationship between the visual threshold and the size of the surrounding field. Lighting Research and Technology, 1 (4), P251–253.
- [Adr 89] Adrian W. (1989): Visibility of targets: Model for calculation. Lighting Research and Technology, 21 (4), P181–188.
- [Adr 93] Adrian W. (1993): Visibility level und die Sichtbarkeit in der Straßenbeleuchtung. Licht 10, S. 734–739.
- [Adr 95] Adrian W. (1995): Über die Berechnung der Sichtbarkeit. Licht 10. S. 820–826.
- [Arm 96] Arminger G., et al. (1996): Einfluss der Witterung auf das Unfallgeschehen. Schlussbericht zum BAST-Forschungsbericht 8901.
- [Aul 64] Aulhorn E. (1964): Über die Beziehung zwischen Lichtsinn und Sehschärfe. Gräfes Archiv für klinische und experimentelle Ophthalmologie. Vol. 167, Nr. 1, S. 4–74.

- [Bae 90] Baer R. (1990): Beleuchtungstechnik – Grundlagen. Verlag Technik.
- [Ber 43] Berek M. (1943): Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung von Lichtreizen. Zeitschrift für Instrumentenkunde, S. 297–309.
- [Bla 46] Blackwell R. (1946): Contrast Thresholds of the Human Eye. J. Opt. Soc. Am. 36, P624.
- [Bla 59] Blackwell R. (1959): Specification of interior illumination levels (on the basis of performance data). Ill. Eng. 54 (6), P317.
- [Bor 93] Bortz J. (1993): Statistik. Springer-Verlag, 4. Auflage.
- [Bou 36] Bouma P. J. (1936): Die Blendungsfrage bei der Straßenbeleuchtung. Philips Techn. Rdsch. 1 (8), S. 225f.
- [Büh 14] Bühl A. (2014): SPSS 22 – Einführung in die moderne Datenanalyse. Verlag Pearson, 14. Auflage.
- [CEN 13] prEN 13201 (2013): Road lighting.
- [CIE 76] CIE Publication 31 (1976): Glare and uniformity in road lighting installations.
- [CIE 81] CIE Publication 19.2 (1981): An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance.
- [CIE 10] CIE Publication 115 (2010): Lighting of roads for motor and pedestrian traffic.
- [CIE 00] CIE Publication 140 (2000): Road lighting calculations.
- [CIE 01] CIE Publication 144 (2001): Road surface and road marking reflection characteristics.
- [CIE 02] CIE Publication 146 (2002): CIE equations for disability glare.
- [Cra 36] Crawford B. M. (1936): The integrations of the effects from a number of glare sources. In: Proceedings Phys. Soc. London 48, P35.
- [DIN 04] DIN EN 13201 (2004): Straßenbeleuchtung.

-
- [Eck 93] Eckert M. (1993): Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr. Verlag Technik.
- [Eic 70] Eichhoff L. (1970): Möglichkeiten zur quantitativen Erfassung der physiologischen Blendung. Lichttechnik, 22. Jahrgang Nr. 4. S. 185–188.
- [Fry 55] Fry G. A. (1955): Physiological basis of disability glare. In: Proceedings, CIE Zürich, Vol. I 1.42 U-F/4 P2.
- [Gre 93] Greule R. (1993): Kontrastschwellen bei transienter Adaptation. Universität Karlsruhe (LTI), Dissertation.
- [Gui 54] Guilford J. P. (1954): Psychometric Methods, McGraw-Hill (N.Y.), Toronto, London.
- [Har 63] Hartmann E. (1963): Die Schwelle der physiologischen Blendung. In: Lichttechnik 15, Nr. 10, S. 503f.
- [Har 74] Hartmann E., Ucke Ch. (1974): Der Einfluss der Blendquellengröße auf die physiologische Blendung bei kleinen Blendwinkeln. In: Lichttechnik 20, Nr. 1, S. 20f.
- [Hen 67] Hentschel H.-J. (1967): Über eine allgemeine Bewertung des Kontrastes in der Straßenbeleuchtung. Lichttechnik, 19. Jahrgang Nr. 5, S. 56A–58A.
- [Hen 69] Hentschel H.-J. (1969): Zur Frage der Unterschiedsschwelle und einer allgemeinen Bewertung des Kontrastes großer zusammengesetzter Objekte im Straßenverkehr. Lichttechnik, 21. Jahrgang Nr. 3. S. 26A–28A.
- [Hen 87] Hentschel H.-J. (1987): Licht und Beleuchtung. Heidelberg: Dr.-Alfred-Hüthig-Verlag.
- [Hol 14] Holm C. (2014): Zwölf Autos in einer Nacht. Der Spiegel, 7, S. 42–43.
- [Hol 26] Holladay L. L. (1926): The fundamentals of glare and visibility. J. Opt. Soc. Amer. 12, P271.

- [Keb 66] Kebschull W. (1966): Leuchtdichteverhältnisse auf feuchten Straßen. *Lichttechnik*, 18. Jahrgang Nr. 9. S. 109A–114A.
- [Kha 09] Khanh T. Q., et al. (2009): Eine Analyse aktueller LED-Straßenleuchten aus lichttechnischer Sicht. In: *Licht*, Nr. 1/2, S. 88f.
- [Lec 94] Lecocq, J. (1994): Visibility and lighting of wet roads. *Lighting Res. Technol.* 26(2), P75–87.
- [Lin 76] Lindner H., Knoche H. (1976): Anpassungsleistungen des optischen Analysators. Lehrbrief der TH Ilmenau.
- [Lit 81] LiTG Publikation Nr. 10 (1981): Methoden zur Ermittlung und Bewertung der Blendung durch ortsfeste Straßenbeleuchtung. LiTG e. V., Karlsruhe.
- [Moo 45] Moon P., Spencer D. E. (1945): The visual effect of non-uniform surrounds. *J. Opt. Soc. Amer.* 35, P233.
- [Nar 74] Narisada K., Yoshikawa K. (1974): Tunnel entrance lighting – effect of fixation point and other factors on the determination of requirements. *Lighting Research Technol.* Vol 6, No 1, P9–18.
- [Nar 77] Narisada K., Yoshimura Y. (1977): Adaptation luminance of driver's eyes at the entrance of tunnel... an objective measuring method. *International Symposium on measures of road lighting effectiveness*, Karlsruhe, Session 1, Fundamentals, P56.
- [Nar 95] Narisada K. (1995): Perception in complex fields under road lighting conditions. In: *Lighting Res. Technol.* 27(3), P123.
- [Nar 03] Narisada K. (2003): Visual problems associated with driving experiments. *PAL 2003 Symposium*, TU Darmstadt, P698–714.
- [Nar 07] Narisada K. (2007): Revealing power and road lighting design. *18th Biennial TRB Visibility Symposium*, Washington.
- [Neu 00] Neundorf W. (2000): Matlab – Teil IV, Approximation, numerische Integration. Preprint No. M, 11/10.
- [Neu 03] Neundorf, W. (2002): Numerische Mathematik. Vorlesungen, Übungen, Algorithmen und Programme. Shaker Verlag GmbH

Aachen.

- [Neu 14] Neundorf W. (2014): Matlab-Quellcode zur Entwicklung der Näherungsformeln.
- [Pah 56] Pahl A., Chodura R. (1956): Zum Blendungsproblem in der Straßenbeleuchtung. Lichttechnik, 8. Jahrgang Nr. 11, S. 480f.
- [Sch 13] Schierz Ch. (2013): Die Psychophysik der Wahrnehmungsschwelle: Von Webner und Fechner zur Signaldetektionstheorie. Lux Junior 2013, Dörfeld/Ilmenau.
- [Sch 14] Schierz Ch. (2014): Grundlagen des nächtlichen Sehens. LiTG Tagung Straßen- und Außenbeleuchtung, Weimar.
- [Sch 15a] Schierz Ch. (2015): Physiologische Optik. Vorlesungsskript, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik.
- [Sch 15b] Schierz Ch. (2015): Psychophysik. Vorlesungsfolien, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik.
- [Sto 14] Stockmar A. (2014): Berechnungsdaten zur herkömmlichen und erweiterten Tl -Berechnung auf Basis der Schwellendaten von Narisada.
- [Sto 15a] Stockmar A. (2015): Berechnungsdaten zur herkömmlichen und erweiterten Tl -Berechnung auf Basis der eigenen Schwellendaten.
- [Sto 15b] Stockmar A. (2015): Programm STL364 zur Berechnung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichte-Verteilungen auf Fahrbahnen entsprechend DIN 5044, CIE 30/2 oder 140 sowie EN 13201. LCI Light Consult International, Version 2015.
- [Ueb 11] Ueberschaer A., Walkling A. (2011): Unterschiedswahrnehmung bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern und Bewertung des spektralen Einflusses auf die Akzeptanz in der Straßenbeleuchtung. Tagung 10. Lux Junior 2011, Dörfeld/Ilmenau.
- [Ueb 14] Ueberschaer A., et al. (2014): VBA-Quellcode zur Übertragung der Messdaten von XML-Datei nach Excell.

- [Ueb 15] Ueberschaer A., et al. (2015): Matlab-Quellcode zur Ermittlung der psychometrischen Funktion.
- [Van 76] Van Bommel W. J. M (1976): Optimization of the quality of road lighting installations – especially under adverse weather conditions, Journal of IES, P99.
- [Völ 06] Völker, S. (2006): Hell- und Kontrastempfindung – ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern. Habilitationsschrift. Universität Paderborn.
- [Vos 60] Vos J. J., Bouman M. A. (1960): Disability glare: theory and practice. In: Proceedings CIE Bruxelles 1959 vol. B, Publications CIE No. 5, P298.
- [Vos 99] Vos J. J., Van den Berg T. J. (1999): On the course of the disability glare function and its attribution to components of ocular scatter. In: CIE collection on colour and vision 124/2, P11.
- [Wal 12] Walkling A., Schierz Ch. (2012): Grundlegende Untersuchung zur Unterschiedswahrnehmung bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern in der Straßenbeleuchtung. Tagung LICHT 2012, Berlin, Tagungsband, S. 400–404.
- [Wal 14a] Walkling A., et al. (2014): Erweitertes *TI*-Verfahren für eine präzisere Erfassung der physiologischen Blendung. Tagung LICHT 2014, Den Haag/Niederlande.
- [Wal 14b] Walkling A., et al. (2014): 2-LVK-Straßenbeleuchtung für nasse und trockene Straßen – zweckmäßig oder nicht? Tagung LICHT 2014, Den Haag/Niederlande.
- [Wal 15] Walkling A., et al.: Extended *TI*-formula for a more precise measure of disability glare due to road lighting. Proceedings CIE Session 2015, Manchester (UK), Vol. 1, Part 1, P745–750.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leuchtdichteunterschiede ΔL und Tarnzonen T_z für verschiedene Reflexionsgrade (ρ) einer Hindernistafel als Funktion einer straßenachsenparallelen Position zwischen zwei Straßenleuchten (nach Hentschel [Hen 87]). Der Wert für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} beträgt hier $0,12 \text{ cd/m}^2$ (Bild: Ch. Schierz)	18
Abbildung 2: Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} für verschiedene Sehwinkel α des Objektes im Bereich der Straßenbeleuchtung als Funktion der Umgebungsleuchtdichte L_u (nach Adrian [Adr 95]).....	20
Abbildung 3: Schematische Darstellung vom Streulichtverlauf im Auge (Bild: Ch. Schierz)	22
Abbildung 4: Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} als Funktion der Holladayischen Adaptationsleuchtdichte $L_{a,h}$ bzw. der Summe aus Umgebungsleuchtdichte L_u und Schleierleuchtdichte L_s (nach Eckert [Eck 93])	23
Abbildung 5: Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,\text{äq}}$ als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m für verschiedene Schwellenwerterhöhungen TI (nach Eichhoff [Eic 70])	26
Abbildung 6: Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} eines 4' großen Objektes bei verschiedenen Umgebungsleuchtdichten L_u und der Darbietungsdauer t (berechnet nach Adrian [Adr 95])	31
Abbildung 7: Abhängigkeit des Kontrastpolaritätsfaktors F_{CP} von der Umgebungsleuchtdichte L_u und vom Sehwinkel α	32
Abbildung 8: Relativer Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} in Abhängigkeit vom Alter (nach Adrian [Adr 95])	33
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (nach Narisada [Nar 95])	37
Abbildung 10: Veränderung im Blickfeld des Beobachters bei Testserie-A und Testserie-B (nach Narisada [Nar 07])	38
Abbildung 11: Verlauf der Schwellenkurven ΔL_{\min} in Abhängigkeit von den Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ (Kurve A) bzw. L_f (Kurve B) (nach Narisada [Nar 77]).....	39
Abbildung 12: Zusammenhang zwischen der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} und den Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ (Kurve A) bzw. L_f (Kurve B) sowie zwischen	

der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} und der Leuchtdichte $L_{s,k}$ (Kurve C), die dem rein physikalischen Effekt entspricht (nach Narisada [Nar 77]) ..	40
Abbildung 13: Verhältnis R für verschiedene Blickrichtungen β mit den Winkelrichtungen $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ und 90° im unteren Sehfeld (nach Adrian [Adr 93])...	43
Abbildung 14: Verhältnis R für verschiedene Umgebungsleuchtdichten L_u mit dem Sehwinkel $\alpha = 23'$ und der Winkelrichtung $\gamma = 0^\circ$ (nach Adrian [Adr 93]) ...	43
Abbildung 15: Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte L_u und Darbietungsart (foveal, extrafoveal) des Sehbildes mit $\alpha = 10'$ und $t = 1$ s bzw. 0,12 s (nach Hentschel [Hen 69])	44
Abbildung 16: Schwellenwertbestimmung mittels Konstanzmethode: s-förmige Antwortkurve einer Versuchspersonengruppe für die Detektion verschiedener Leuchtdichteunterschiede (Reizintensitäten) bei der Testserie-A (linke Kurve) und Testserie-B (rechte Kurve)	48
Abbildung 17: Schematischer Aufbau der autonomen Versuchsanordnung	49
Abbildung 18: Ansicht der Versuchsanordnung mit Versuchsleiter (rechts sitzend) und Versuchsperson (links sitzend). Im Versuch sind die Haupt- und Nebenkammer vollständig mithilfe des schwarzen Stoffes geschlossen (Foto: I. Herzog)	49
Abbildung 19: Ansicht der Aufstellung der beiden Projektoren mit getrennten Filterstufen. Projektor 1 befindet sich in der oberen, Projektor 2 in der unteren Position (Foto: I. Herzog)	50
Abbildung 20: Ansicht der Bildschirmoberfläche des Steuer-Laptops für die Auswahl eines Tests	51
Abbildung 21: Ansicht der Bildschirmoberfläche des Steuer-Laptops beim Fall „Abbruch“	52
Abbildung 22: Ansicht der Anordnung des separaten Photometerkopfes zur Kalibrierung. Weiter oben im Bild das kreisförmige Adaptationsfeld/Schleierfeld mit Fixationspunkt (Foto: I. Herzog)	53
Abbildung 23: Ansicht der örtlichen Kalibrierung der beiden Projektoren (Projektor 1 mit rotem und Projektor 2 mit grünem Farbkreuz) und rotem Laserpunkt im Zentrum (Foto: I. Herzog)	54

Abbildung 24: Ansicht des quadratischen Testzeichens mit kreisrundem Hintergrundfeld (Projektor 2).....	55
Abbildung 25: Ansicht des kreisrunden Adaptationsfeldes gleichzeitig fungierend als Schleierfeld mit Fixationspunkt (Projektor 1).....	56
Abbildung 26: Ansicht der Leuchtdichtevertelung von Projektor 1 vor und nach der Korrektur der Gleichmäßigkeit im Adaptationsfeld/Schleierfeld (Kreisregion)	57
Abbildung 27: Optionen bei fovealer Beobachtung ($\beta = 0,2^\circ$) mit Adaptationsfeld/Schleierfeld im Blickfeld der Versuchsperson in Testserie-A. Links: foveale Darbietung des Sehobjektes links vom roten Fixationspunkt. Rechts: foveale Darbietung rechts vom Fixationspunkt	57
Abbildung 28: Optionen bei extrafovealer Beobachtung ($\beta = 1,8^\circ$) mit Adaptationsfeld/Schleierfeld im Blickfeld der Versuchsperson in Testserie-A. Links: extrafoveale Darbietung des Sehobjektes links vom roten Fixationspunkt. Mitte: extrafoveale Darbietung rechts vom roten Fixationspunkt. Rechts: extrafoveale Darbietung unten.....	58
Abbildung 29: Optionen bei fovealer Beobachtung ($\beta = 0,2^\circ$) ohne Adaptationsfeld/Schleierfeld im Blickfeld der Versuchsperson in Testserie-B. Links: foveale Darbietung des Sehobjektes links vom roten Fixationspunkt. Rechts: foveale Darbietung rechts vom Fixationspunkt	58
Abbildung 30: Optionen bei extrafovealer Beobachtung ($\beta = 1,8^\circ$) ohne Adaptationsfeld/Schleierfeld im Blickfeld der Versuchsperson in Testserie-B. Links: extrafoveale Darbietung des Sehobjektes links vom roten Fixationspunkt. Mitte: extrafoveale Darbietung rechts vom roten Fixationspunkt. Rechts: extrafoveale Darbietung unten	59
Abbildung 31: Alters- und Geschlechterverteilung der Versuchspersonen (Vpn), Durchschnittsalter des Beobachterkollektives: (27 ± 4) a	63
Abbildung 32: Interindividuelle Streuung hinsichtlich des mittleren Schwellenwertes. Messzeitpunkte M1 bis M4. Parameter: foveal, $\alpha = 10'$, $t = 0,2$ s, $L_{a,n,A}$ (Testserie-A) = $L_{a,n,B}$ (Testserie-B) = 5 cd/m^2	69
Abbildung 33: Verlauf der Leuchtdichteänderung und der Testobjektdarbietung bei einem Leuchtdichtepuls als Abwärtspuls (links) und einem Leuchtdichtesprung	

- als Abwärtssprung (rechts) für die Anwendung von TAF_1 (links) und TAF_2 (rechts) mit $\tau = 0,3\text{ s}$ 71
- Abbildung 34: Kurvenverlauf des Schwellenerhöhungsfaktors Φ in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte L_u . Parameter: Leuchtdichteverhältnis $L_{u,1}/L_{u,2}$ 72
- Abbildung 35: Beispiele für Antwortkurven einer Versuchsperson. Links: s-förmiger Kurvenverlauf ($L_{a,n} = 1,0\text{ cd/m}^2$) inklusive der Korrektur des Schwellenwertes (mit $p_{\text{Detektion}} = 0,512$) basierend auf einer falschen Alarmrate $p_{\text{Detektion}} = 0,025$. Rechts: unerwarteter Kurvenverlauf ($L_{a,n} = 0,2\text{ cd/m}^2$) als großer Ausreißer ..
.....74
- Abbildung 36: Beispielhafte Punkteverteilung im Normalverteilungsdiagramm (auch Q-Q-Diagramm genannt) einer Versuchspersonengruppe. Im Normalverteilungsfall liegen die Punkte auf der Geraden. Im Beispiel ist die Abweichung von der Geraden hinreichend gering. Als Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Tests erhält man $p = 0,2$. Damit kann eine Normalverteilung angenommen werden76
- Abbildung 37: Verlauf der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) bei der Testserie-A (Kurve A) in Abhängigkeit der Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ und bei der Testserie-B (Kurve B) in Abhängigkeit der Leuchtdichte L_f . Parameter: foveal, $t = 0,12\text{ s}$ 77
- Abbildung 38: Vergleich der Einzelschwellenwertverteilung der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (linkes Diagramm) und Testserie-B (rechtes Diagramm) mit den Messergebnissen von Narisada (roter Punkt). Parameter: foveal, $t = 0,12\text{ s}$ 78
- Abbildung 39: Vergleich der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (als Funktion von $L_{a,n,A}$) mit dem Messwertergebnis von Narisada (als Funktion von $L_{a,n,A}$) sowie mit dem Berechnungsergebnis nach Adrian (als Funktion von $L_{a,h}$). Parameter: foveal, $t = 0,12\text{ s}$, Alter = 27 a79
- Abbildung 40: Verlauf der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) bei der Testserie-A (Kurve A mit Regressionsgleichung: $y = 0,0346 + 0,0347x - 9,5257 \cdot 10^{-5}x^2$ mit $R^2 = 0,99$) in

- Abhängigkeit von $L_{s,l,k}$ und bei der Testserie-B (Kurve B mit Regressionsgleichung: $y = 0,0205 + 0,0023x - 3,051 \cdot 10^{-5}x^2$ mit $R^2 = 0,99$) in Abhängigkeit von L_f . Parameter: foveal, $t = 0,2$ s 80
- Abbildung 41: Vergleich der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (als Funktion von $L_{a,n,A}$) mit dem Berechnungsergebnis nach Adrian (als Funktion von $L_{a,h}$). Parameter: foveal, $t = 0,2$ s, Alter = 27 a 81
- Abbildung 42: Vergleich der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (Kurve A, als Funktion von $L_{a,n,A}$) und Testserie-B (Kurve B, als Funktion von $L_{a,n,B}$) mit dem Berechnungsergebnis nach Adrian (als Funktion von $L_{a,h}$). Parameter: foveal, $t = 0,12$ s (gestrichelte Kurve), $t = 0,2$ s (voll ausgezogene Kurve), Alter = 27 a 81
- Abbildung 43: Vergleich der Zeitfaktoren der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (Kurve A) bzw. Testserie-B (Kurve B) in Abhängigkeit von $L_{a,n,A}$ bzw. $L_{a,n,B}$ mit dem Berechnungsergebnis nach Adrian in Abhängigkeit von $L_{a,h}$. Ermittelte Zeitfaktoren bei Kurve A (von ca. 1,8 auf 1,2), bei Kurve B (ca. 2,1) und bei Kurve Adrian (ca. 1,2). Parameter: foveal, Alter = 27 a 82
- Abbildung 44: Verlauf der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) bei der Testserie-A (Kurve A mit Regressionsgleichung: $y = 0,0451 + 0,081x - 0,0003x^2$ mit $R^2 = 0,99$) in Abhängigkeit der Leuchtdichte $L_{s,l,k}$ und bei der Testserie-B (Kurve B mit Regressionsgleichung: $y = 0,0184 + 0,0015x + 4,2747 \cdot 10^{-6}x^2$ mit $R^2 = 0,98$) in Abhängigkeit der Leuchtdichte L_f . Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), $t = 0,2$ s 83
- Abbildung 45: Vergleich der mittleren Schwellenwerte ΔL_{\min} (mit dargestellten Fehlerbalken für das 95 %-Konfidenzintervall) der extrafovealen Ergebnisse für die Testserie-A (voll ausgezogene Kurve A, als Funktion von $L_{s,l,k}$) und Testserie-B (gestrichelte Kurve B, als Funktion von L_f) mit den fovealen Ergebnissen. Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), foveal, $t = 0,2$ s 84
- Abbildung 46: Vergleich des R -Verhältnisses der eigenen Ergebnisse für die Testserie-A (Kurve A) mit den Berechnungsergebnissen nach Adrian in

Abhängigkeit der Leuchtdichten $L_{a,n,A}$ (Kurve A) bzw. $L_{a,h}$ (Kurve Adrian). Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$)/foveal, Alter = 27 a.....	85
Abbildung 47: Prinzipieller Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m	89
Abbildung 48: Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q}$ in Abhängigkeit von der mitt- leren Fahrbahnleuchtdichte L_m für konstante prozentuale Schwellenwert- erhöhungen TI (nach Eichhoff [Eic 70])	90
Abbildung 49: Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q}$ in Abhängigkeit der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m zur Erläuterung der Gültigkeit der gegenwärtigen TI -Formel. Die Kurven entsprechen den Näherungs- gleichungen (7) und (26)	91
Abbildung 50: Prinzipieller Zusammenhang zwischen der Leuchtdichteunter- schiedsschwelle ΔL_{\min} und der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m (entspricht der Kurve B) sowie zwischen der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{\min} und der Summe aus äquivalenter Schleierleuchtdichte und Hintergrund- leuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q} + L_h$ (entspricht der Kurve C)	93
Abbildung 51: Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q}$ in Abhängigkeit von der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m und der Hintergrundleuchtdichte L_h bei den Schwellenwerterhöhungen $TI = 2\%$, 15% und 100% . Parameter: foveal, $t = 0,2\text{ s}$ (Versuchsreihe II)	94
Abbildung 52: Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q}$ in Abhängigkeit von der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m und der Hintergrundleuchtdichte L_h bei den Schwellenwerterhöhungen $TI = 2\%$, 15% und 100% . Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), $t = 0,2\text{ s}$ (Versuchsreihe III)	95
Abbildung 53: Relativer Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q}$ in Abhängigkeit von der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m und der Hintergrund- leuchtdichte L_h bei trockener Fahrbahn (C2, [CIE 01]) und nasser Fahrbahn (W4, [CIE 01]) für foveales Sehen	96
Abbildung 54: Verlauf der Schwellenkurven B und C als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m (Kurve B) und als Funktion der Summe von der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q}$ und Hintergrundleuchtdichte L_h (Kurve C). Parameter: foveal, $\alpha = 10'$, $t = 0,2\text{ s}$	97

Abbildung 55: Verlauf der Schwellenkurven B und C als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m (Kurve B) und als Funktion der Summe von der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,äq}$ und Hintergrundleuchtdichte L_h (Kurve C). Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), $\alpha = 10'$, $t = 0,2\text{ s}$	98
Abbildung 56: Vergleich zwischen den Werten für TI nach herkömmlicher Gleichung (7) und erweiterten Gleichungen (30) und (32) für die trockene Fahrbahn an den Beobachterstandorten des sich vorwärtsbewegenden Beobachters. Der anfängliche Beobachterstandort hat die Nummer 1....	103
Abbildung 57: Vergleich zwischen den Werten für TI nach herkömmlicher Gleichung (7) und erweiterten Gleichungen (31) und (33) für die nasse Fahr- bahn an den Beobachterstandorten.....	104
Abbildung 58: Vergleich zwischen den Werten für TI nach den erweiterten Gleichungen (30) und (32) für foveales Sehen sowie den erweiterten Gleichungen (31) und (33) für peripheres Sehen für die trockene Fahrbahn an den Beobachterstandorten.....	104
Abbildung 59: Erfasster Raumwinkel der Versuchsfelder für die foveale (3°) und extrafoveale (4°) Beobachtung im Hinblick auf einer zugrunde liegenden typischen, europäischen Stadtverkehrsstraße mit einer Fahrbahnbreite von 7 m bis 7,5 m. Die Blickrichtung entspricht der Mitte einer Fahrspur, wobei die Blicklinie die Fahrbahn in einer Entfernung von 60–70 m kreuzt.	111
Abbildung 60: Messdaten für die Zeitreihe des relativen Lichtstroms der beiden Projektoren PT-DZ6700EL ($0,99 \pm 0,007$) und DLA-RS45E ($0,89 \pm 0,035$). PT- DZ6700EL (Projektor 1) wird für das Adaptationsfeld/Schleierfeld und DLA- RS45E (Projektor 2) zur Darbietung des Objekts mit Hintergrund verwendet	112
Abbildung 61: Ablauf der Untersuchung mit den Testserien A und B. Jede Sitzung enthielt eine 15-minütige Dunkeladaptation. Je Leuchtdichtestufe wurde eine 2-minütige Voradaptation auf die jeweilige Leuchtdichte vorgenommen, bevor das entsprechende Testintervall wiederholt durchgeführt wurde. Die Test- intervalle mit einer Gesamtdauer von 3 s (Testserie-A) oder 5 s (Testserie-B) beinhalteten die Darbietung des Schleier-/Adaptationsfeldes und Objektes (hier $t = 0,2\text{ s}$) sowie ein Zeitfenster von 2 s für die Antwort der Versuchs- person	113

- Abbildung 62: Antwortkurven aus der Versuchsreihe I von Versuchspersonengruppen für die Detektion verschiedener Leuchtdichteunterschiede ΔL (Reizintensitäten) bei der Testserie-A (für Kurve A) und bei der Testserie-B (für Kurve B). Parameter: foveal, $t = 0,12$ s, Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ bzw. L_f mit $1,0 \text{ cd/m}^2$, $5,0 \text{ cd/m}^2$ und 25 cd/m^2 115
- Abbildung 63: Antwortkurven aus der Versuchsreihe II von Versuchspersonengruppen für die Detektion verschiedener Leuchtdichteunterschiede ΔL (Reizintensitäten) bei der Testserie-A (für Kurve A) und bei der Testserie-B (für Kurve B). Parameter: foveal, $t = 0,2$ s, Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ bzw. L_f mit $0,20 \text{ cd/m}^2$, $1,0 \text{ cd/m}^2$, $5,0 \text{ cd/m}^2$ und 25 cd/m^2 116
- Abbildung 64: Antwortkurven aus der Versuchsreihe III von Versuchspersonengruppen für die Detektion verschiedener Leuchtdichteunterschiede ΔL (Reizintensitäten) bei der Testserie-A (für Kurve A) und bei der Testserie-B (für Kurve B). Parameter: extrafoveal ($\beta = 1,8^\circ$), $t = 0,2$ s, Leuchtdichten $L_{s,l,k}$ bzw. L_f mit $0,20 \text{ cd/m}^2$, $1,0 \text{ cd/m}^2$, $5,0 \text{ cd/m}^2$ und 25 cd/m^2 117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsparameter der Versuchsreihe I	61
Tabelle 2: Versuchsparameter der Versuchsreihe II	62
Tabelle 3: Versuchsparameter der Versuchsreihe III	62
Tabelle 4: Fehler-Tabelle zur Bestimmung des resultierenden relativen Maximalfehlers in Versuchsreihe I bei der fovealen Schwellenmessung. Eingangsgrößen: $\alpha = 10'$, $t = 0,12\text{ s}$, $L_a = 1, 5$ oder 25 cd/m^2 , $R = 1$	66
Tabelle 5: Fehler-Tabelle zur Bestimmung des resultierenden relativen Maximalfehlers in Versuchsreihe II bei der fovealen Schwellenmessung. Eingangsgrößen: $\alpha = 10'$, $t = 0,2\text{ s}$, $L_a = 0,2, 1, 5$ oder 25 cd/m^2 , $R = 1$	66
Tabelle 6: Fehler-Tabelle zur Bestimmung des resultierenden relativen Maximalfehlers in Versuchsreihe III bei der extrafovealen Schwellenmessung. Eingangsgrößen: $\alpha = 10'$, $t = 0,2\text{ s}$, $L_a = 0,2, 1, 5$ oder 25 cd/m^2 , $R = 1,65, 1,8, 2, 2,17$ (nach Gleichung (15) in Kapitel 3.3)	67
Tabelle 7: Zu untersuchende Testfälle mit den entsprechenden statistischen Tests auf Basis der individuellen Daten der einzelnen Versuchspersonen	75
Tabelle 8: Ergebnisse für die berechnete Irrtumswahrscheinlichkeit p für alle Testfälle, den dazugehörigen Leuchtdichten L_a und Testserien A und B basierend auf dem Kolmogorov-Smirnov-Test bzw. Shapiro-Wilk-Test* .	114
Tabelle 9: Schwellenwert-Tabelle für Versuchsreihe I	115
Tabelle 10: Schwellenwert-Tabelle für Versuchsreihe II	116
Tabelle 11: Schwellenwert-Tabelle für Versuchsreihe III	117

Abkürzung und Symbole

B	Beobachter
BCD	Borderline between Comfort and Discomfort
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
C2	CIE-Klasse für die Standarddeckschicht einer trockenen Fahrbahn
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
H	Hintergrund
HS	Halbspiegel
LCI	Light Consult International
LF	Leuchtdichtefeld
LGS	lineares Gleichungssystem
LK	Lichtkasten
LMK	Leuchtdichtemesskamera
Maple	Mathematical Manipulation Language
MATLAB	Matrix Laboratory
M1, M2, M3, M4	Messzeitpunkte
O	Objekt (Sehobjekt)
SHK	studentische Hilfskraft
SPSS	Superior Performing Software System
Tz	Tarnzonen
W4	CIE-Klasse für die Standarddeckschicht einer nassen Fahrbahn
VCTS	Visual Contrast Test System
Vpn	Versuchspersonen
XML	Extensible Markup Language

a_{br}	Blondel-Rey-Konstante
AF	Faktor zur Berücksichtigung des Alters
α	Sehwinkel des Objektes in ' (Bogenminuten)
β	Exzentrizität bzgl. Blickrichtung in ° (Grad)
E_{Bl}	Beleuchtungsstärke am Auge durch eine Blendquelle
EIR	Edge Illuminance Ratio
F_{CP}	Contrast Polarity Factor
ε	Approximationsfehler in %
γ	von der Horizontale nach unten gemessener Winkel in Blickrichtung in °
$\Delta\alpha$	Maximalfehler der Eingangsgröße Objektgröße in '
ΔL	Leuchtdichteunterschied in cd/m^2
ΔL_a	Maximalfehler der Eingangsgröße Adaptationsleuchtdichte in cd/m^2
ΔL_{min}	Leuchtdichteunterschiedsschwelle in cd/m^2
$\Delta L_{min,A}$	Leuchtdichteunterschiedsschwelle der Kurve A in cd/m^2
$\Delta L_{min,B}$	Leuchtdichteunterschiedsschwelle der Kurve C in cd/m^2
$\Delta L_{min,Bl}$	Leuchtdichteunterschiedsschwelle mit Blendung in cd/m^2
$\Delta L_{min,C}$	Leuchtdichteunterschiedsschwelle der Kurve C in cd/m^2
$\Delta L_{min,oBl}$	Leuchtdichteunterschiedsschwelle ohne Blendung in cd/m^2
Δt	Maximalfehler der Eingangsgröße Darbietungsdauer in s
Δz	resultierende absolute Maximalgesamtfehler der Ausgangsgröße Leuchtdichteunterschied in cd/m^2
K	tatsächlicher Kontrast
K_{Bl}	wahrgenommener Kontrast infolge Blendung
K_{min}	Kontrastschwelle

k_a	altersabhängige Konstante
k_u	Konstante
k_w	Konstante für die Wahrnehmungswahrscheinlichkeit
L_a	Adaptationsleuchtdichte in cd/m^2
$L_{a,h}$	Adaptationsleuchtdichte nach Holladay in cd/m^2
$L_{a,n}$	Adaptationsleuchtdichte nach Narisada in cd/m^2
$L_{a,n,A}$	Adaptationsleuchtdichte in Testserie-A nach Narisada in cd/m^2
$L_{a,n,B}$	Adaptationsleuchtdichte in Testserie-B nach Narisada in cd/m^2
$L_{a,ms}$	Adaptationsleuchtdichte nach Moon/Spencer in cd/m^2
L_f	foveale Adaptationsleuchtdichte in cd/m^2
L_h	Hintergrundleuchtdichte in cd/m^2
L_{\max}	maximale Leuchtdichte im Bewertungsfeld in cd/m^2
L_{\min}	minimale Leuchtdichte im Bewertungsfeld in cd/m^2
L_o	Objektleuchtdichte in cd/m^2
L_s	Schleierleuchtdichte in cd/m^2
$L_{s,\ddot{a}q}$	äquivalente Schleierleuchtdichte in cd/m^2
$L_{s,d,l}$	physiologischer Effekt der Schleierleuchtdichte infolge der dezentralen Umgebung in cd/m^2
$L_{s,l}$	physiologischer Effekt der Schleierleuchtdichte infolge Blendung in cd/m^2
$L_{s,l,k}$	physiologischer und physikalischer Effekt der Schleierleuchtdichte infolge Blendung in cd/m^2
$L_{s,k}$	physikalischer Effekt der Schleierleuchtdichte infolge Blendung in cd/m^2
L_u	Umgebungsleuchtdichte in cd/m^2
$L_{u,1}$	Umgebungsleuchtdichte vor dem Dunkeladaptationspuls

$L_{u,2}$	Umgebungsleuchtdichte während des Dunkeladaptationspulses
$L_{u,d}$	Leuchtdichte der dezentralen Umgebung in cd/m^2
$L_{u,z}$	Leuchtdichte der zentralen Umgebung in cd/m^2
L_m	mittlere Fahrbahnleuchtdichte in cd/m^2
L_w	Leuchtdichtefunktion
m	Konstante
n	Konstante
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
$p_{\text{Detektion}}$	Detektionsrate
Φ	Schwellenerhöhungsfaktor
Φ_w	Lichtstromfunktion
R	Verhältnis zwischen extrafovealer und fovealer Unterschiedsschwelle
RCS	relative Kontrastempfindlichkeit
ρ	Reflexionsgrad
SR	Surround Ratio
t	Darbietungsdauer in s
t_p	Pulsdauer in s
θ	Blendwinkel zwischen Blendquelle und Blickrichtung in °
τ	Zeitspanne zwischen einer Leuchtdichteänderung und der Darbietung eines Testsehobjektes
τ_0	Zeitpunkt an dem die transiente Adaptation beendet ist
TAF_1	Glance Transient Adaptation Factor
TAF_2	Readaptation Transient Adaptation Factor
TI	Schwellenwerterhöhung in %

